

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Návrh technologie výroby kovací zápustky

Design of Production Technology of Die Forging Form

Student: Radim Vlček
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra obrábění, montáže a strojírenské metrologie

Zadání bakalářské práce

Student:

Radim Vlček

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

2303R002 Strojírenská technologie

Téma:

Návrh technologie výroby kovací zápustky
Design of Production Technology of Die Forging Form

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod.
2. Výroba kovacích zápustek.
3. Návrh technologie obrábění.
4. Technicko-ekonomické zhodnocení.
5. Závěr.

Seznam doporučené odborné literatury:

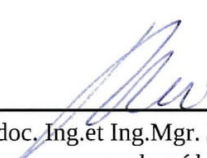
DUŠÁK, K. *Technologie montáže. Základy*. 1. vyd. Liberec : Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2005. 116 s. ISBN 80-7083-906-6.
PETRŮ, J.; ČEP, R. *Základy montáže*. Ostrava : Fakulta strojní VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2012. s. 123. ISBN 978-80-248-2773-5.
HENZOLD, G. *Geometrical Dimensioning and Tolerancing for Design, Manufacturing and Inspection: A Handbook for Geometrical Product Specification Using ISO and ASME Standards*. Amsterdam : Butterworth-Heinemann, 2006, 411 s. ISBN 978-07-506-6738-8.
WHITNEY, Daniel E. *Mechanical Assemblies: Their Design, Manufacture, and Role in Product Development*. Oxford : Oxford University Press, USA, 2004. 544 p. s. ISBN 978-01-951-5782-6.


Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Tomáš Zlámal, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019


doc. Ing. et Ing. Mgr. Jana Petrů, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019.



.....
Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato diplomová práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019.

.....
Podpis autora práce

Jméno a příjmení autora práce: Radim Vlček

Adresa trvalého pobytu autora práce: Národního Odboje 13, Paskov

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VLČEK, R. *Návrh technologie výroby kovací zápustky: bakalářská práce.* Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra obrábění, montáže a strojní metrologie, 2019, 75 s. Vedoucí práce: Zlámal, T.

Tato bakalářská práce se zabývá výrobou kovací zápustky metodou obrábění. Úvodní část práce je zaměřena na rozbor kovacích zápustek z hlediska použití, materiálů, tepelného zpracování a povrchový úprav. V další části je zpracována metodika obrábění kovacích zápustek. Následující část je zaměřená na výrobu kovací zápustky. V této části je zpracován postup výroby od výběru materiálu, až po výrobu zápustky na univerzální CNC frézce DMU 50. V závěru práce je vyhodnocení chyb vzniklých při samotném frézování, a návrh opatření, k zamezení jejich vzniku, při dalším obrábění.

ANNOTATION OF BACHLEOR THESIS

VLČEK, R. *Design of Production Technology of Die Forging Form: Bachelor Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Departmen of Machining, Assembly and Engineering Metrology, 2019, 75 p. Thesis head: Zlámal, T.

This bachelor thesis is dealing with production technology of forging die by machining method. The introduction part is focused on analysis of forging dies concerning usage, materials, heat treatment and surface finish. The following part focuses on process of the methodology of machining the forging dies. Then, a part is focus on producing the forging die. In this part, a process of production – from choosing the material to production of the forging die using the universal CNC milling machine DMU 50 – is described. The final part of the thesis evaluates the mistakes during the milling and suggests measures in order to avoid the mistakes in the following milling.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	8
Úvod	10
1. Obecný popis technologie kování a kovacích zápustek	11
1.1 Kování	11
1.2 Zápustkové kování	12
1.3 Kovací zápustky	12
1.4 Zápustkové materiály	13
1.5 Tepelné zpracování zápustkových materiálů	15
1.5.1 Metody tepelného zpracování zápustek	15
1.6 Povrchová úprava zápustek	19
1.6.1 Nitridace	20
1.6.2 Povrchové navařování	21
1.6.3 Povlakování zápustek	21
2. Metody obrábění při výrobě kovacích zápustek	22
2.1 Problematika obrábění zápustkových materiálů	22
2.1.1 Slinutý karbid	23
2.1.2 Řezná keramika	26
2.1.3 Kubický nitrid bóru	28
2.2 Výroba zápustek frézováním	29
2.2.1 Tvarové frézování	29
2.2.2 Strategie stanovení dráhy nástroje	32
2.2.3 Hrubování zápustek	33
2.2.4 Dokončování	34
2.3 Moderní způsoby výroby zápustek	36
2.3.1 Elektroerozivní obrábění	36
2.3.2 Vysokorychlostní frézování	37

3.	Návrh výroby kovací zápustky.....	39
3.1	Materiál a polotovar pro výrobu	39
3.1.1	Materiál pro výrobu zkušební vzorku.....	39
3.1.2	Materiál pro výrobu kovací zápustky	40
3.1.3	Polotovar zápustky	40
3.2	Příprava výroby.....	41
3.2.1	Volba stroje	41
3.2.2	Volba upnutí	42
3.2.3	Analýza modelu.....	43
3.2.4	Volba nástrojů	44
3.3	Výroba formy frézováním	50
3.3.1	Technologický postup a výroba 1. strany.....	51
3.3.2	Technologický postup a výroba 2. strany.....	56
4.	Zhodnocení.....	64
4.1	Posouzení kvality výroby.....	64
4.1.1	Analýza povrchových vad.....	66
4.2	Ekonomické zhodnocení výroby	66
	Závěr.....	68
	Poděkování.....	69
	Použitá literatura	70
	Seznam příloh.....	75

Seznam použitých značek a symbolů

ZNAČKA	NÁZEV	JEDNOTKA
3D	-třírozměrná soustava	[-]
A	-tažnost	[%]
A _{cl}	-kritická teplota rekrystalizace	[° C]
ARA	-anizotermický rozpadu austenitu	[-]
CAD	-počítačem podporované modelování	[-]
CAM	-počítačem podporované obrábění	[-]
CBN	-kubický nitrid bóru	[-]
CNC	-číslicové řízení počítačem	[-]
CVD	-chemická depozice z plynné fáze	[-]
D	-obráběcí průměr	[mm]
D _{max}	-maximální obráběcí průměr	[mm]
HB	-tvrdost podle Brinella	[-]
HV	-tvrdost podle Vickerse	[-]
MTCVD	-chemická depozice z plynné fáze za středních teplot	[-]
MWPCVD	-mikrovlnní plazmatická chemická depozice z plynné fáze	[-]
PCVD	-plazmaticky aktivována chemická depozice z plynné fáze	[-]
PD	-polykrystalický diamant	[-]
PVD	-fyzikální depozice z plynné fáze	[-]
R _a	-střední aritmetická odchylka drsnosti	[μm]
R _m	-mez pevnosti	[MPa]
RO	-rychlořezná ocel	[-]
R _p	-mez kluzu určena z trvalé deformace pod zatížením	[MPa]
SK	-slinutý karbid	[-]
VBD	-vyměnitelná břitová destička	[-]
X	-rozjezd v ose x	[mm]
Y	-rozjezd v ose y	[mm]
Z	-rozjezd v ose z	[mm]
a _e	-šířka řezu (krok frézy)	[mm]
a _p	-hloubka řezu	[mm]
a _{p max}	-maximální hloubka řezu	[mm]
f _z	-posuv na zub	[mm]

r	-hodnota zaoblení	[mm]
v_c	-řezná rychlost	$[m \cdot min^{-1}]$
z	-počet efektivních obvodových břitů	[-]

Úvod

Zápustkové kování patří v mnoha ohledech mezi nenahraditelné způsoby zpracování kovových materiálů. Téměř všechny velké průmysly v ČR, jako např. energetický, železniční, automobilový a letecký využívají zápuskové kování pro schopnost vyrábět velké množství dílů za krátký čas a ve vysoké kvalitě. Aby byly kovárny schopné využít maximální potenciál výroby, je potřeba vyrábět kvalitní kovací nástroje, tzv zápustky.

Zápustky se vyrábějí z nástrojových ocelí. Tyto oceli musí mít specifické vlastnosti, aby odolaly velmi vysokým tlakům, teplotám a opotřebení při samotném kovacím procesu, aniž by docházelo ke změnám rozměrů zápustky nebo k praskání. Aby ocel získala vhodné vlastnosti, musí projít specifickými procesy. Jedná se o teplené zpracování, chemicko-teplené zpracování a často také povrchové úpravy ve formě povlakování či navařování speciálních slitin na povrch zápustky. Aplikace těchto procesů má vliv na např. tvrdost, otěruvzdornost, žárupevnost a koeficient tření. Díky tomu se výrazně zvyšuje životnost zápustky.

Aby mohlo kování být přesné, je třeba vyrobit zápustkovou dutinu přesně. Zápustková dutina může mít téměř libovolný tvar v závislosti na složitosti finálního výkovku. Výroba tvaru zápustkové dutiny se provádí dvěma metodami. Buď je dutina zhotovena třískovým obráběním, kdy je materiál odebrán třískově, nebo elektroerozivním obráběním, kdy je materiál odebrán na základě eroze, způsobenou elektrickým výbojem mezi anodou a katodou. Obě metody mají určité výhody, ale také omezení.

Obecně rozšířenější metoda je třískové obrábění, kdy se formy zhotovují na 3osých a 5tiosých obráběcích strojích. U třískového obrábění je velmi důležité zvolit správný technologický postup, kdy se určí vhodná strategie výroby složitých tvarových ploch. Od technologického postupu a materiálu polotovaru se dále odvíjí volba nástrojů a rezných materiálů.

Cílem práce je výroba kovací zápustky pomocí 5tiosé univerzální frézky, ověření správnosti navržené technologie a zpracování případných nedostatků. V případě výskytu nedostatků bude nutné navrhnout řešení k jejich eliminaci.

1. Obecný popis technologie kování a kovacích zápustek

Tváření kovů je technologický proces, při kterém dochází ke změně tvaru materiálu v důsledku působení vnějších sil. Podstatou tváření je vznik plastických deformací, ke kterým dojde v momentě dosažení meze kluzu daného materiálu. Tento děj je provázen změnami struktury materiálu, které mají vliv na jeho mechanické vlastnosti.

Tváření je rozděleno z hlediska teploty na tváření za tepla a tváření za studena. Hraniční teplotou je teplota rekrytalizace materiálu. Pokud tváření probíhá při teplotách nižších než je teplota rekrytalizace, jedná se o tváření za studena. V případě tváření za vyšších teplot než teplota rekrytalizace jedná se o tváření za tepla.

Technologie tváření, mezi které patří zápustkové kování má ve výrobě strojních součástí velmi vysoké uplatnění. Především je to dáno vysokou produktivitou práce, vysokým využitím materiálu a dobrou rozměrovou přesností tvářených výrobků. Ovšem samotná technologie je omezena rozměry výrobků.^{1,2}

1.1 Kování

Kování je proces, při kterém materiál podléhá plastické deformaci. Touto deformací tváříme materiál do zvoleného tvaru. Tento děj je prováděn především za zvýšené teploty, a to buď klidně působící silou nebo opakovanými rázy. Kování zlepšuje mikrostrukturu materiálu a zlepšuje fyzikální a mechanické vlastnosti součástí. Kováním lze zpracovávat téměř všechny kovy. Mezi nejčastěji zpracovávané patří ocel, hliník, hořčík, mosaz, bronz, měď.³

Kování je rozdělováno na:

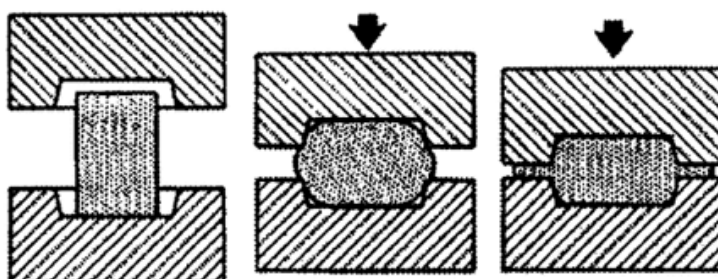
- Volné kování – kování na kovadlině nebo za pomoci univerzálních kovacích podložek. Používány jsou jednoduché kovací nástroje a výsledné výkovky mohou mít pouze omezený tvar.¹
- Zápustkové kování – kování, při kterém je materiál vtlačován do dutiny nástroje. Používané nástroje se nazývají zápustky a výsledné výkovky mohou být tvarově složitější.¹

1.2 Zápustkové kování

Zápustkové kování slouží k výrobě velkého množství stejných součástí. Hlavním nástrojem zápustkového kování je zápustka. Zápustkové kování je omezeno rozměry a hmotností. Oproti volnému kování je zápustkové kování přesnější. Přesnost a jakost povrchu se zlepšuje následným kalibrováním, kdy lze dosáhnout dostatečné kvality povrchu, aniž by muselo být použito obrábění. Zápustkovým kovááním je dosahováno vysokého stupně prokovování. Prokovování zlepšuje mechanické vlastnosti materiálu.

Při zápustkovém kování je vkládán výchozí polotovár ohřátý na potřebnou kovací teplotu do dutiny zápustky. Na polotovár je působeno tvářecí silou, která způsobí deformaci materiálu a vyplní materiálem dutinu zápustky. Přebytečný materiál je odveden do výronkové drážky a vzniká výronek.

K zápustkovému kování se používají buchary (kování úderem) nebo lis (kování klidným tlakem). Při kování bucharem je výkovek zhotoven postupnými údery beranu. Při kování lisem výkovek zhotoví jedním zdvihem, nebo několika zdvihy v případě postupové zápustky.^{1, 3, 4}



Obr. 1.1 Schéma zápustkového kování³

1.3 Kovací zápustky

Kovací zápustka je jednoúčelový nástroj, který slouží pro přesnou výrobu výkovků. Kovací zápustky jsou vyrobeny z nástrojové oceli se zvýšenou odolností vůči otěru a vysokým teplotám. Zápustková dutina odpovídá tvaru výkovku, její tvar je ovšem přizpůsoben pro tepelné smrštění výkovku.

Kovací zápustky se nejčastěji skládají ze dvou částí, a to z horní zápustky a spodní zápustky. Horní a spodní zápustka je rozdělena dělicí rovinou. Horní zápustka je umístěná na pohyblivou část tvářecího stroje a je přitlačována na spodní zápustku, která je umístěná na statické části stroje.^{3, 5, 6}

Rozdělení zápustek^{3, 5, 6}

- podle kovacího stroje:
 - zápustky pro buchary – *výkovky menší hmotnosti*
 - zápustky pro lisy – *výkovky větších rozměrů a větších průřezů*
 - zápustky pro kovací stroje
- podle dutiny:
 - s otevřenou dutinou – *výkovky s výronkovou drážkou*
 - s uzavřenou dutinou – *výkovky bez výronkové drážky, tzv. přesné kování*
- podle počtu dutin:
 - jednorázové – *zápustka s jednou dutinou*
 - postupové – *zápustka s více dutinami*
 - násobné – *zápustka pro výrobu více výkovků najednou*
- podle operace:
 - předkovací
 - dokončovací
 - kalibrovací
 - ostříhovací

1.4 Zápustkové materiály

Zápustky jsou namáhány především tepelně a mechanicky. Obě namáhání mají vliv na výběr oceli, ze které jsou zápustky vyrobeny. Dle starší, ale ve strojírenství stále používané normy ČSN 42 0002 se používají oceli třídy 19, tedy nástrojové oceli. Pro zápustky pracující za tepla jsou dle velikosti namáhání a velikosti samotné formy vhodné oceli třídy 19 4xx až 19 7xx, tedy oceli legované. Uhlíkové oceli lze použít jen u zápustek méně tepelně namáhané a pro menší počet výkovků. Pro tepelně namáhané zápustky jsou vhodné oceli legované s nižším obsahem uhlíku (0,3 až 0,5 %). Častými legujícími prvky těchto ocelí bývají Cr, Ni, Mo, W, Si, V. Nejvíce tepelně namáhané zápustky se vyrábějí z ocelí s vysokým obsahem W (až 10 %) a jsou vysoce odolné proti popuštění.

Nejčastěji používané oceli jsou 19 552 a 19 663. Dle aktuální normy ČSN EN 10027-2 mají tyto oceli značení 1.2343 a 1.2714.^{7, 8}

Druhy namáhání zápustek ^{7,9}

- Mechanické namáhání

Dochází k němu při působení sil na zápustku. Síly působící na zápustku způsobují roztahování a stlačování formy. Z dlouhodobého hlediska dochází k únavě formy a může dojít ke změnám rozměrů nebo únavovému lomu. Dále v místech největšího tečení materiálu dochází k otěru zápustky. Otěr způsobuje změnu rozměru zápustky, a také se ze zápustky odstraňují povrchové vrstvy, které mohou mít vliv na správnou funkci zápustky.

- Tepelné namáhání

Časté střídání teplot způsobené tvářením za tepla způsobuje vznik napětí. Toto napětí v kombinaci s mechanickým opotřebením je častou příčinou vzniku trhlin. Trhliny se stávají koncentrátorem napětí a zvyšují riziko vzniku únavového lomu.

Hlavní požadavky na oceli pro zápustky ^{7,9}

- Vysoká pevnost a houževnatost v rozsahu kovacích teplot.
- Vysoká odolnost proti opotřebení, vysoká otěruvzdornost.
- Dobrá prokalitelnost a co nejvyšší popouštěcí teplota.
- Nízká tepelná roztažnost a vysoká tepelná vodivost.
- Dobrá obrobitelnost.

Tab. 1.1 Doporučené zápuskové oceli se zřetelem na velikost a namáhání zápustky ⁷

Označení oceli dle ČSN 42 0002	Použití oceli se zřetelem na	
	Velikost zápustky	Namáhání zápustky
19 464	malé a střední zápustky	mírně tepelně namáhané nástroje
19 552	malé zápustky o tl. do 200 mm	vysoce tepelně namáhané, houževnaté nástroje
19 650	malé, střední a velké zápustky	středně tep. namáhané nástroje s dobrou houževnatostí
19 662	střední a velké zápustky	středně tep. namáhané nástroje s velkou houževnatostí
19 663	malé, střední a velké zápustky	středně tep. namáhané nástroje s velkou houževnatostí
19 720	malé zápustky o tl. do 200 mm	vysoce tepelně namáhané, dosti houževnaté nástroje

Pozn.: Oceli jsou značeny pouze dle staré normy ČSN 42 0002. Aktuální norma nenahradila většinu ocelí nacházející se v tabulce.

1.5 Tepelné zpracování zápusťkových materiálů

Tepelným zpracováním se rozumí všechny postupy, při nichž je předmět nebo materiál záměrně ohříván a ochlazován tak, aby bylo dosaženo požadovaných vlastností.

Tepelným zpracováním ovlivňuje mechanické vlastnosti jako je pevnost, tvrdost, tažnost, vrubová houževnatost a odolnost proti opotřebením. Často je tepelným zpracováním dosaženo fázových přeměn a změny struktury materiálu. Dosažení rovnovážného stavu při fázových přeměnách je zcela určováno difuzí. Průběh difuze ovlivňuje teplota a doba výdrže na teplotě, při které může difuze probíhat.

Při výrobě zápusťek je často používáno tepelné zpracování. Hlavní důvody jsou snížení pnutí vzniklých předchozí operací a zvýšení tvrdosti a odolnosti vůči opotřebením.¹⁰

1.5.1 Metody tepelného zpracování zápusťek

Mezi obecné základní metody tepelného zpracování patří žíhání, kalení, popouštění a zušlechťování. Další méně používané metody tepelného zpracování jsou patentování, rozpouštění, vytvrzování a povrchové kalení. Tyto metody jsou často označovány jako speciální.

Pro výrobu zápusťek se nejčastěji využívá žíhání, kalení a popouštění. Největší význam pro samotnou životnost zápusťky má kalení, při kterém zápusťka získává vysokou tvrdost. Zvýšením tvrdosti výrazně klesá houževnatost zápusťky, což má nepříznivý vliv na životnost zápusťky. Proto se pro částečné obnovení houževnatosti aplikuje popouštění.^{10, 11}

Žíhání ve výrobě zápusťek

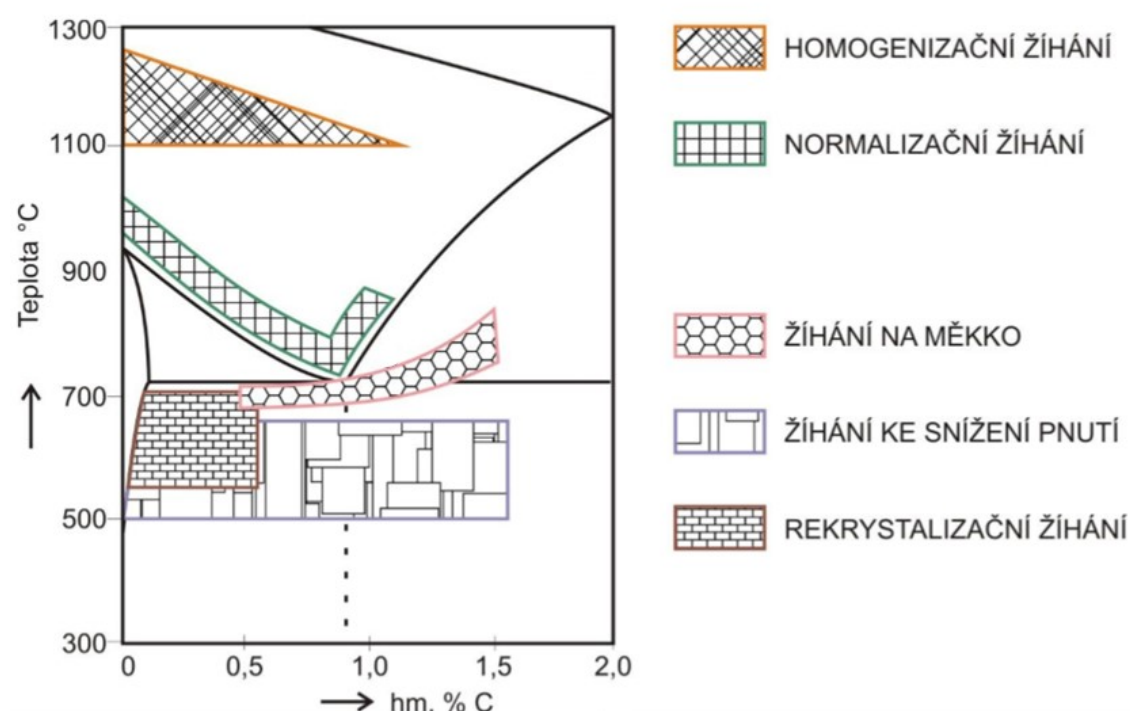
Žíhání představuje různé procesy tepelného zpracování, jejichž společným znakem je snaha o přiblížení k rovnovážnému stavu zpracovávané oceli. Všechny režimy žíhání zahrnují ohřev součásti, výdrž součásti na teplotě a pozvolné ochlazování.

Účelem žíhání při výrobě zápusťek je snížení pnutí, které vznikají jako vedlejší účinky v průběhu výroby. Často aplikováno žíhání ke snížení pnutí, popřípadě se volí vhodnější režim žíhání pro určitou situaci. Pnutí nejčastěji vzniká v průběhu obrábění, při kterém se volí metody pro co největší úběr materiálu v nejkratším čase, tzv. hrubování. Při hrubování vzniká napětí jak od mechanických, tak od teplotních vlivů obrábění.^{12, 13}

Cílem žíhání je: ^{12, 13}

- odstranění vlivu předchozí operace na strukturu materiálu,
- snížení tvrdosti,
- snížení vnitřních pnutí,
- snížení nerovnoměrnosti chemického složení.

Žíhání můžeme rozdělit podle toho, zda při něm probíhá fázová přeměna. Rozdělujeme jej tedy na **žíhání bez překrystalizace** a **žíhání s překrystalizací**.



Obr. 1.2 Schématické znázornění režimů žíhání v diagramu Fe-C ¹²

Žíhání bez překrystalizace ^{12, 13}

Teplota žíhání nepřekračuje teplotu A_{c1} (727 °C) s výjimkou (žíhání na měkko u nadeuktoidních ocelí). Rozsah fázových změn je zanedbatelný a poměr feritu s austenitem se nemění. Mění se tvar a velikost zrn, koncentrace a rozdělení mřížkových poruch a velikost vnitřního pnutí. Rozdělení:

- žíhání ke snížení pnutí,
- rekrystalizační žíhání,
- žíhání na měkko.

Žihání s překrystalizací^{12, 13}

Teplota přesahuje teplotu A_{c1} , dochází k úplné nebo téměř úplné přeměně výchozí struktury. Ocel získá se větší rovnoměrnost struktury a odstraní se chemická nehomogenita oceli.

Rozdělení:

- homogenizační žihání,
- normalizační žihání,
- izotermické žihání.

Kalení ve výrobě zápuštěk

Kalení je proces, který zahrnuje ohřev oceli na kalicí teplotu, výdrž na této teplotě za účelem homogenizace austenitu. Ochlazením nadkritickou rychlostí dochází ke vzniku nerovnovážný stavů oceli, a vzniká martenzitická nebo bainitická struktura.

Dle nároků na zápuskové materiály se pro zlepšení vlastností oceli aplikuje právě kalení. Kalení zlepšuje vlastnosti oceli, ovšem mohou vzniknout i nežádoucí efekty jako např. trhliny. Proto se kalená ocel dále tepelně zpracovává. Vlastnosti získané kalením významně zvyšují životnost zápuštěk.

Cílem kalení je:^{12, 13, 14}

- zvýšení pevnosti a tvrdosti,
- zvýšení odolnosti proti opotřebení,
- zvýšení odolnosti vůči únavovému namáhání.

Kalitelnost

Schopnost oceli dosáhnout rychlým ochlazením zvýšení tvrdosti. Kalitelnost závisí na obsahu uhlíku. Nekalitelné jsou oceli nízkouhlíkové a vysokolegované nepolymorfni oceli s feritickou nebo austenitickou strukturou.¹²

Prokalitelnost

Schopnost oceli získat po zakalení tvrdost odpovídající její zakalitelnosti v určité hloubce pod povrchem kaleného předmětu. Kritériem prokalitelnosti je výskyt struktury s 50 % martenzitu ve středu průřezu. Prokalitelnost bude závislá na diagramu ARA. Tvar diagramu ARA ovlivňují přísadové prvky. Veškeré prvky s výjimkou kobaltu, které se rozpouštějí v austenitu, zpomalují rozpad austenitu a posouvají křivky ARA diagramu doprava k delším časům. Snižují tedy kritickou rychlost ochlazování.^{12, 15}

Způsoby kalení

Způsob kalení se volí v závislosti na požadovaných vlastnostech kaleného předmětu. Způsoby kalení můžeme rozdělit na dva způsoby, a to ***přímé kalení*** a ***přetržité kalení***.¹²

Přímé kalení

Jedná se o plynulé ochlazování předmětu v prostředí o pokojové nebo zvýšené teplotě. Výhodou přímého kalení je technologická nenáročnost a nižší cena kaleného výrobku. Nevýhodou přímého kalení je vysoká úroveň vnitřních pnutí, deformace, jenž může mít za následek vznik trhlin.¹²

Přetržité kalení

Cílem přetržitého kalení je snížení vnitřních pnutí, omezení deformace kaleného předmětu a zamezení případných trhlin.

Principem přetržitého kalení je ochlazování předmětu ve dvou prostředích. Rozdíl v prostředí je buď v intenzitě ochlazování nebo teplotách samotných prostředí.¹²

Kalící prostředí

Různá ochlazovací prostředí jsou charakterizována různou rychlostí ochlazování. Rychlost ochlazování musí být vyšší než kritická rychlost ochlazování, proto má kalící prostředí významný vliv na správný průběh kalení.^{12, 15}

Rychlost ochlazování závisí na:^{12, 15}

- rozměrech a tvaru součásti,
- tepelné vodivosti kaleného předmětu,
- intenzitě odvodu tepla z povrchu do kalícího prostředí.

Nejčastěji používaná kalící prostředí:^{12, 15}

- voda,
- roztok NaOH ve vodě,
- minerální olej,
- roztavené kovy,
- klidný vzduch.

Popouštění ve výrobě zápustek

Popouštění je metoda tepelného zpracování, která následuje po kalení. Účelem popouštění je snížení vnitřního pnutí vzniklého při kalení a zvýšení houževnatosti struktury. Popouštění se také používá pro snížení maximální tvrdosti.

Při kalení zápustek, vznikne jak vnitřní pnutí, tak velmi vysoká tvrdost. Velmi vysoká tvrdost má na zápustky nepříznivý vliv, zejména kvůli vzniku trhlin při tvářecím procesu. Popouštěním se sníží hodnota tvrdosti a zvýší se houževnatost zápustky. Hodnota houževnatosti závisí na maximální přípustné tvrdosti, které mohou být použity pro příslušné lisy.^{12, 13, 14}

Nízkoteplotní popouštění

Je realizováno při teplotách 100 až 300 °C. U nástrojových a vysocelegovaných ocelí až při teplotě 600 °C. Cílem nízkoteplotního popouštění je snížení obsahu vnitřních pnutí a zmenšení obsahu zbytkového austenitu.^{12, 16}

Vysokoteplotní popouštění

Je realizováno při teplotách 400 až 650 °C. Cílem vysokoteplotního popouštění je dosažení ideální kombinace pevnostních vlastností, houževnatosti a plasticity. Kalení a následné vysokoteplotní popouštění je označováno jako zušlechťování. Výsledná struktura se vyznačuje vysokou pevností, houževnatostí a zvýšenou mezí kluzu.^{12, 16}

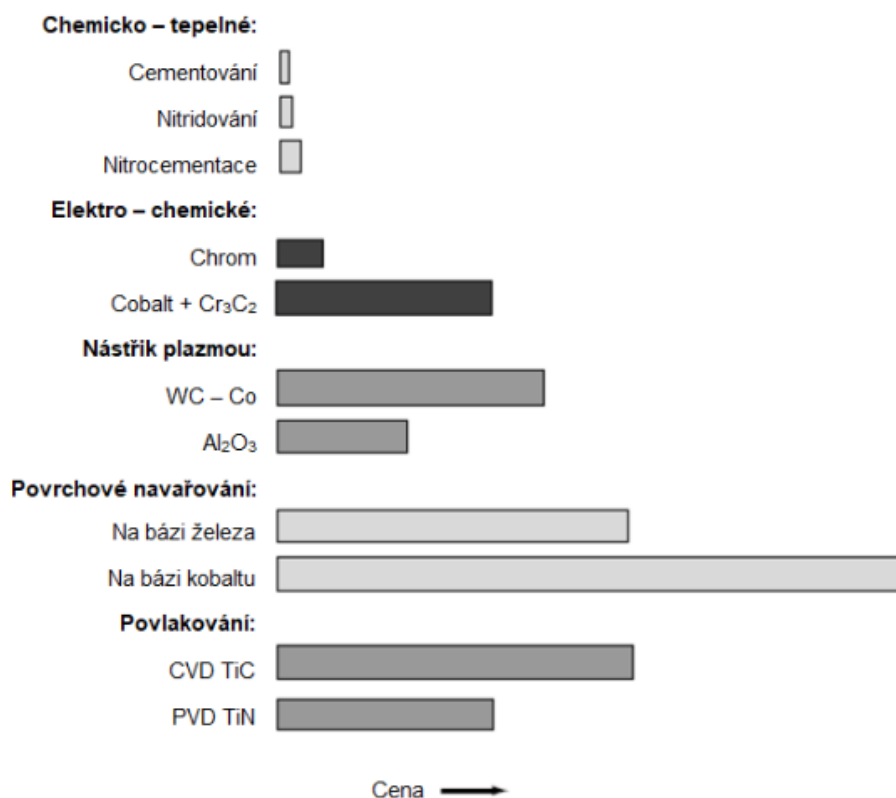
1.6 Povrchová úprava zápustek

Při tvářecím procesu působí na zápustky namáhání. Toto namáhání má největší vliv na samotný povrch zápustky, kde je mechanické i tepelné namáhání nejintenzivnější. Z toho důvodu se většina vad vytváří na povrchu zápustky. Povrchové úpravy podstatně zlepšují vlastnosti povrchu a zvyšují tím životnost zápustek. Většina povrchových úprav se používá pro zvýšení tvrdosti, protože opotřebení zápustky se s rostoucí tvrdostí snižuje.

Nejčastějšími povrchovými úpravami pro kování za tepla je nitridování, nebo bórování. Pro kování za studena se nejčastěji používají povlaky keramické, PDV a CVD. Povlaky PVD a CVD mají určité využití i za zvýšených teplot.

Povrchové úpravy jsou často aplikovány jako finální úprava zápusťky. Zápusťka již musí být tepelně zpracována a obrobena na konečné rozměry. Výjimkou je povrchové navařování, po kterém se často aplikuje obrábění, popř. tepelné zpracování.

Jedním z důležitých kritérií při výběru povrchových úprav jsou náklady. Na Obr. 1.3 jsou ilustračně zobrazeny náklady na různé povrchové úpravy.¹⁴



Obr. 1.3 Přibližné relativní náklady metod povrchových úprav¹⁴

1.6.1 Nitridace

Nitridace je sycení povrchu dusíkem při teplotách 450 °C až 550 °C. Výsledkem je velmi tvrdá povrchová vrstva, která obsahuje velmi tvrdé nitridy. Nitridací lze získat povrchovou tvrdost až 1200 HV.

Nitridace snižuje míru opotřebení zápusťky až o 50 % a zvyšuje odolnost proti tepelné únavě na povrchu. Přestože dochází ke zvýšení tvrdosti a odolnosti proti únavě materiálu, nitridováním se snižuje houževnatost povrchu zápusťky. V důsledku poklesu houževnatosti může docházet k tříštění nitridovaných hran. Zvláště náchylné jsou ostré rohy.^{12, 14}

1.6.2 Povrchové navařování

Jedná se o metodu podobnou svařování, ovšem oproti svařování není účelem spojení materiálu, ale nanášení vrstvy materiálu. Povrchové navařování se nejčastěji používá pro opravu nebo údržbu opotřebovaných zápustek. Opravují se praskliny, nebo změny rozměrů z důvodů opotřebení. Často využívané je robotické svařování, díky kterému lze napodobit tvar opravované zápustky. Díky tomu je možné ušetřit velké množství materiálu, který již nemusí být odebrán obráběním viz Obr. 1.4.



Obr. 1.4 Příklad opravy zápustky za pomoci robotického navařování ¹⁷

Další aplikací povrchového navařování je vytvoření povrchové vrstvy, která má vysokou odolnost proti vysokým teplotám. Nejčastěji používanými materiály jsou slitiny kobaltu a niklu. Aplikace těchto slitin zvyšuje životnost zápustky. ^{14, 18}

1.6.3 Povlakování zápustek

Povlaky zlepšují odolnost proti opotřebení, zvyšují životnost zápustek a snižují koeficient tření na povrchu zápustky. Tloušťky povlaku jsou velice malé (1 až 15 μm).

Povlakování se používá především pro zápustky, které pracují při nižších teplotách. Povlaky i přesto musí odolávat teplotám a vysokým tlakům, při nichž se nesmí odstranit z nanášeného povrchu. Odolnost proti opotřebení a přilnavost povlaků závisí na předúpravě povrchu zápustky. Povlaky mají vyšší účinnost a lepší přilnavost, pokud je povrch po nitridaci. Přilnavost se dále zvyšuje v případném leštění nitridovaných povrchů. ^{14, 19}

2. Metody obrábění při výrobě kovacích zápustek

Obrábění je nejčastěji používaným způsobem výroby kovacích zápustek. Složitě tvarové plochy se zhotovují na CNC strojích za použití moderních nástrojů a metod.

Pomocí programu CAD se tvar zápustek převede na 3D model. S 3D modelem se poté pracuje v programu CAM, kde se navrhují všechny potřebné parametry, nástroje, dráhy a strategie, které budou použity pro výrobu. Následně se data z CAM programu převádějí na datový jazyk konkrétního stroje, a to pomocí softwarového datového převodníku, který se nazývá postprocesor. Správně nastavený postprocesor je velmi důležitý pro převedení všech funkcí z CAM programu do CNC stroje. Převedený soubor se následně nahraje do příslušného CNC stroje, kde se zápustka vyrobí.

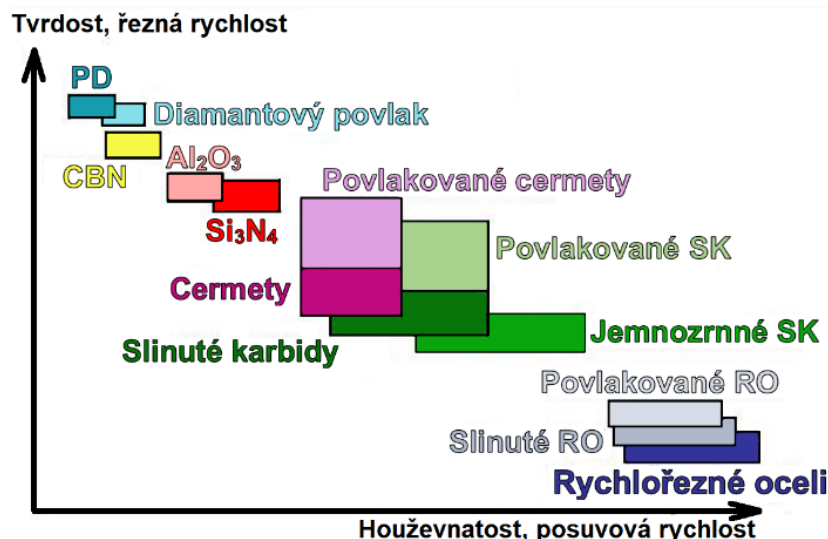
Mezi moderní směry ve výrobě zápustek patří elektroerozivní obrábění a vysokorychlostní frézování. Oproti klasickému obrábění přináší tyto metody do výroby zápustek jisté výhody, ať už v možnosti výroby kontur, které jinou metodou nelze vyrobit, nebo v rychlosti odebrání materiálu.^{20, 21}

2.1 Problematika obrábění zápustkových materiálů

Materiály pro výrobu zápustek jsou nízkolegované nástrojové oceli, tepelné zpracovávané kalením. Obvykle nejsou korozivzdorné, protože obsah chromu v těchto ocelích není příliš vysoký. Díky ostatním legujícím prvkům a kalení nabývá ocel vysoké tvrdosti.

Vysoká pevnost, množství legujících prvků, tepelné úpravy materiálu a vlastnosti jako otěruvzdornost a žárupevnost, výrazně snižují obrobiteľnost. Nižší obrobiteľnost znamená vyšší nároky na stroj, nástroj a upnutí. Největší podíl na správném obrábění zápustkových materiálů má nástroj a řezné materiály, kterými je osazen.

Pro obrábění tvrdých a velmi tvrdých materiálů je nutné použít tvrdé řezné materiály. Nejčastěji se používají materiály jako CBN a řezná keramika. Díky moderním povlakům lze pro kalenou ocel využít i slinutý karbid. Na Obr. 2.1 lze porovnat tvrdost řezných materiálů, vztah mezi tvrdostí a houževnatostí řezných materiálů.²²



Obr. 2.1 Závislost tvrdosti a houževnatosti pro různé řezné materiály ²³
 RO – rychlořezná ocel, SK – slinutý karbid, Al_2O_3 – řezná keramika na bázi oxidu hlinitého, Si_3N_4 – řezná keramika na bázi nitridu křemíku, CBN – kubický nitrid bóru, PD – polykrystalický diamant

2.1.1 Slinutý karbid

Slinutý karbid je dvoufázový nebo vícefázový materiál který se skládá z tvrdých karbidových částí a z pojiva. Je vyráběn práškovou metalurgií, kde je struktura tvořena karbidy wolframu, karbidy titanu a pojivem, kterým je nejčastěji kobalt. Častými dalšími přísadami jsou karbidy tantalu a karbidy niobu.

V minulosti se používaly nepovlakované slinuté karbidy. Dnes se, až na výjimky, používají slinuté karbidy v kombinaci s povlakováním. Povlakované slinuté karbidy jsou složeny z pevného karbidového podkladu a termomechanicky stabilního povlaku. Výsledkem povlakování je zvýšení optimální řezné rychlosti, možnost vyššího úběru třísky a lepší vlastnosti pro přerušovaný řez. Dalším přínosem povlakování slinutého karbidu je snížení koeficientu tření, což má za následek zamezení vzniků nárůstků, a tím zvýšení životnosti nástroje. Povlaky slinutých karbidů byly z počátku jednovrstvé. Častým problémem jednovrstvých povlaků byla náchylnost na oddělení od povrchu slinutého karbidu. Tento problém byl vyřešen vícevrstevným povlakem, kdy jsou jako první nanášeny vrstvy s lepší přilnavostí, a poté se nanesou vrstvy s vysokou tvrdostí a odolností vůči opotřebení. Dnes se používají až desetivrstvé povlaky, méně výraznými přechody mezi jednotlivými vrstvami.

Mezi hlavní metody povlakování slinutých karbidu patří metoda PVD a metoda CVD. Obě metody mají určité využití, a zvláště metoda CVD má omezení v použití z hlediska

pracovní teploty. Proto byly vyvinuty hybridní CVD metody, které nemění princip nanášení povlaku, ale snižují pracovní teplotu. Jsou to metody: ²⁴

- PCVD – plazmaticky aktivovaná CVD metoda (400 až 600 °C)
- MWPCVD – mikrovlnná plazmatická CVD metoda (600 °C)
- MTCVD – CVD za středních teplot (700 až 850 °C)

Povlakování metodou PVD

Metoda PVD, neboli fyzikální napařování, je charakteristická nízkými teplotami při procesu nanášení povlaku. Teplota metody nepřesahuje 550 °C a obvykle se tloušťka povlaku pohybuje v rozmezí 3 až 5 µm. Díky nízkým teplotám je tato metoda vhodná pro povlakování nástrojů z nástrojové oceli, mezi které patří rychlořezná ocel. Pro slinutý karbid byla metoda PVD využívána méně často, ale díky značnému posunu metody, dochází k výraznému rozšíření metody i na slinutý karbid.

Fyzikální proces povlakování probíhá při středním až vysokém vakuu. Při napařování je čistý kov odpařován pomocí elektrického oblou, svazkem elektronů, nebo odporovým ohřevem. Emitované atomární částice reagují s atmosférou komory, kterou tvoří směs plynů inertního a reaktivního a s tepelnou energií dopadají na povrch substrátu, kde se usazují ve formě povlaku, pevně spojeného s povrchem.

K nevýhodám metody PVD patří složitý vakuový systém a požadavek pohybovat povlakovanými předměty tak, aby bylo možné rovnoměrné uložení povlaku po celém povrchu. Nerovnoměrné uložení povlaku souvisí s tzv. stínovým efektem, který způsobuje, že na plochách, které neleží ve směru pohybu odpařování částic, povlak vytvoří menší, nebo žádnou vrstvu. Mezi hlavní výhody PVD patří možnost povlakování ostrých hran díky možností vytvoření malé tloušťky povlaku. ^{21, 25, 26}

Povlakování metodou CVD

Metoda CVD, neboli chemické napařování plynné fáze, je charakteristická vysokými teplotami při procesu nanášení povlaku. Teplota nanášení je v rozmezí 900 až 1000 °C a tloušťka nanášeného povlaku se pohybuje v rozmezí 10 až 15 µm. Tato metoda je nejvyužívanější při povlakování slinutých karbidů.

Chemický proces povlakování je založen na reakci plynných chemických sloučenin v bezprostřední blízkosti povrchu a následném uložení produktů reakce na tomto povrchu.

Základním požadavkem je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale zároveň prchavou sloučeninu, která se v důsledku přivedené energie chemicky rozpadá. Produkty rozkladu jsou ukládány na ohřátý povrch povlakovaného předmětu a působí jako katalyzátor. Aby proběhla reakce, musí být v plynech obsažen nekovový reaktivní plyn (např. N_2). Dále se přivádí tzv. nosný plyn (např. Ar), který dopravuje směs plynů k povlakovanému předmětu. Nosný plyn umožňuje řízení celého procesu a výrazně ovlivňuje rychlost růstu povlaku.

Nevýhody metody CVD jsou vysoké pracovní teploty, které mohou tepelně ovlivňovat vlastnosti povlakovaného předmětu. Aktuální vývoj metody CVD směřuje ke snižování pracovní teploty. Hlavními výhodami je vysoká hustota povlaku, vynikající přilnavost k podkladovému materiálu a rovnoměrnost povlakových vrstev.^{21, 25, 26}

Slinutý karbid se jako každý řezný materiál se rozděluje dle normy ČSN ISO 513 do šesti skupin. Každá skupina se dále dělí do podskupin. Identifikačními znaky jsou písmeno, číslo a barva. Čím je číslo nižší, tím je možné použít vyšší řezné rychlosti. Čím je číslo vyšší, tím roste rychlost posuvu a pevnost. Dle Tab. 2.1 je pro výrobu zápustek vhodný slinutý karbid ze skupiny H.²⁷

Tab. 2.1 Rozdělení slinutého karbidu dle ČSN ISO 513 v závislosti na použití²⁷

Skupina slinutého karbidu	Vhodný materiál pro obrábění
P	Oceli tvořící dlouhou třísku. Nelegované až vysoclegované oceli, včetně ocelí na odlitky a feriticky martenzitické korozivzdorné oceli.
M	Korozivzdorné oceli s obsahem chromu minimálně 12 % (atmosférická korozivzdornost). Oceli žáruvzdorné a žárupevné, otěruvzdorné.
K	Litiny, tvořící krátkou třísku. Nelegovaná i nelegovaná šedá litina, tvrná litina, temperovaná litina.
N	Neželezné kovy – měď, hliník a jejich slitiny, guma, plasty
S	Žáruvzdorné slitiny, superslitiny na bázi Ni nebo Co, Ti.
H	Oceli s tvrdostí v rozmezí 48 až 60 HRC a také tvrzené litiny s tvrdostí 400 až 600 HB.

2.1.2 Řezná keramika

Keramiku můžeme definovat jako krystalický materiál, jehož hlavní složkou jsou anorganické sloučeniny nekovového charakteru. Mezi tradiční keramiku patří porcelán. Představitelem technické keramiky jsou řezné a brousicí materiály.

Keramické řezné materiály mají vysokou tvrdost (i za vysokých teplot), odolnost proti otěru a jsou chemicky stálé. Snášejí teploty 1200 °C i vyšší. Často se používá při vysokých řezných rychlostech, vyšších než 1000 m·min⁻¹. Nevýhodou je křehkost a náchylnost na správnou volbu řezných podmínek. Řezná keramika se vyznačuje především: ^{21,22}

- vysokou tvrdostí i za vysokých teplot,
- odolnosti proti mechanickému namáhání,
- odolnosti proti opotřebení,
- vysokou trvanlivostí a řezavostí,
- odolnost proti korozi a chemickým vlivům.

Pro rozdělení a značení řezné keramiky není zatím dostupná žádná konkrétní norma. Obecně se však používá následující rozdělení:

- na bázi oxidu hlinitého (Al₂O₃)
 - čistá (oxidická keramika) – 99,5 % Al₂O₃
 - směsná keramika – Al₂O₃ + ZrO₂
 - vyztužená keramika – Al₂O₃ + TiC, Al₂O₃ + ZrO₂ + TiC
- na bázi nitridu křemíku (Si₃N₄)

Proces výroby keramických destiček je velmi podobný procesu výroby destiček ze slinutého karbidu a cermetů. Zásadním rozdíle je absence pojiva. Díky tomu je výroba keramických břitových destiček technologicky náročnější a klade vysoké nároky na výrobní zařízení. Vývoj mikrostruktury a slinovatelnost keramiky lze ovlivnit přidáním přísad, které v průběhu slinování vytvářejí kapalnou fázi. Tímto způsobem lze dosáhnout hustějšího uspořádání částic a lepšího zhutnění destičky. Velikost zrn jednotlivých keramických prášku a aditiv se pohybuje kolem 20 nm.

Povlakování řezné keramiky není tak obvyklé jako u slinutých karbidů. Používá se především metoda CVD. Hlavním přínosem povlaku na řezné keramice je snížení šíření

mikrotrhlinek, a tím zvýšení houževnatosti samotné destičky, nebo zvýšení otěruvzdornosti řezných hran.

Řezná keramika patří mezi výkonné řezné materiály. Její použití ve výrobě vyžaduje kromě dodržení řezných podmínek, také dodržování určitých zásad. Tyto zásady zaručují vhodnost použití řezné keramiky pro danou situaci. Mezi hlavní podmínky patří:

- vysoká tuhost systému stroj – nástroj – obrobek,
- použití výkonných obráběcích strojů s širokým rozsahem otáček a posuvové rychlosti,
- bezchybný stav obráběcího stroje,
- výběr vhodné geometrie VBD.

Obrábění řeznou keramikou bylo dlouhou dobu omezeno pouze na nepřerušovaný řez, byla tedy vhodná pro soustružení. Postupným vývojem řezné keramiky dnes většina výrobců dodává řeznou keramiku vhodnou pro přerušované řezy, lze ji tedy použít pro frézování. U frézování je ovšem o to více dbát na systém stroj – nástroj – obrobek, protože je třeba zamezit vzniku vibrací, které mají velmi nepříznivý vliv na životnost destičky.^{21, 22, 26, 28, 29}



Obr. 2.2 Destička z řezné keramiky³⁰

2.1.3 Kubický nitrid bóru

Měkkou hexagonální modifikací vystupuje nitrid bóru v určité analogii s uhlíkem, kde krystalizuje se stejným typem mřížky jako grafit. Přírodní nitrid bóru není vhodný pro výrobu řezných nástrojů, protože díky uspořádání krystalické mřížky je měkký. Teprve transformací na kubickou mřížku získává kubický nitrid bóru tvrdost, která jej řadí na druhé místo v tabulce tvrdosti. Transformace na kubickou mřížku je možný jen za vysokých teplot a tlaků. Kubický nitrid bóru se vyznačuje: ²²

- vysokou tvrdostí,
- chemickou odolností,
- stabilní tvrdosti při vysokých teplotách,
- velkou odolností proti abrazivnímu opotřebení.

Řezné charakteristiky kubického nitridu bóru lze při výrobě ovlivňovat velikostí výchozích krystalů, objemem a typem pojící fáze (většinou keramické) a typem přísadových tvrdých částic (karbidy, nitridy). Kubický nitrid bóru se používá zejména pro soustružení a vyvrtávání. V posledních letech se ovšem vyrábí i jemnozrnné verze kubického nitridu bóru, který má uplatnění i pro frézování.

Nástroje z kubického nitridu bóru zaručují vysoký úběr materiálu i kvalitu obrobeného povrchu. Drsnost povrchu po obrábění se pohybuje okolo $R_a = 0,3 \mu\text{m}$. Díky vynikající profilové drsnosti se kubický nitrid bóru používá jako náhrada broušení a tím je zvýšena produktivita práce.

VBD z kubického nitridu bóru se používají především pro obrábění bíle litiny s tvrdostí nad 50 HRC, legované litiny, tvrdých návarů, kalených ocelí a stelitů. Právě při obrábění těchto materiálu je životnost destičky z kubického nitridu bóru mnohonásobně vyšší než při použití slinutého karbidu nebo řezné keramiky.

Stejně jako keramické materiály, musí být pro kubický nitrid boru splněny podmínky, které nám zaručí použitelnost tohoto materiálu v dané situaci. Mezi hlavní podmínky patří:

- vysoká tuhost systému stroj – nástroj – obrobek,
- použití výkonných obráběcích strojů s širokým rozsahem otáček a posuvové rychlosti,
- bezchybný stav obráběcího stroje,
- výběr vhodné geometrie VBD.

Kubický nitrid bóru je stejně jako řezná keramika velmi náchylný na jakékoliv chvění. V případě výskytu chvění razantně klesá životnost destičky. Pro zvýšení životnosti nástroje a zlepšení drsnosti povrchu se běžně používá chladicí médium. To ovšem není pro kubický nitrid bóru třeba, protože odolnost proti teplotnímu namáhání se blíží k 1500 °C, proto je mnohem výhodnější použít tzv. obrábění za sucha.^{21, 26, 28, 29}



Obr. 2 Destičky z kubického nitridu bóru³⁰

2.2 Výroba zápusťek frézováním

Většina kovacích zápusťek se vyrábí frézováním. Ačkoli funkční plochy zápusťek mohou být rotační, často se využívá při výrobě technologie frézování. Hlavně díky vyšší efektivitě odebrání materiálů a schopnosti velmi přesně vyrobít tvarově složité plochy.

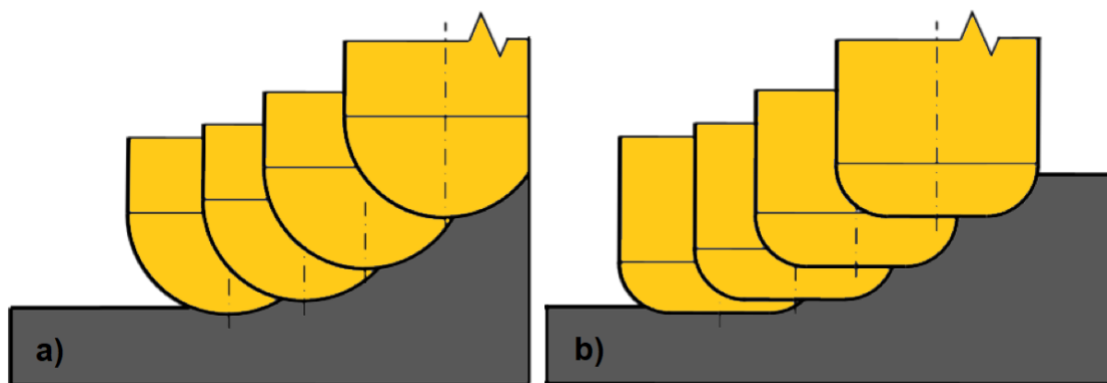
Obrábění tvarově složitých ploch zápusťek je umožňováno díky 3osým až 5tiosým CNC obráběcích strojích za využití nejrůznější geometrie řezných nástrojů. Často tyto stroje využívají pohyb všech os zároveň, aby bylo dosaženo co nejlepších výsledků při zhotovování tvarových ploch. Díky tomu ovšem roste technologická náročnost výroby.²¹

2.2.1 Tvarové frézování

Tvarové frézování zahrnuje víceosé frézování dvojrozměrných a třírozměrných konvexních a konkávních tvarů. Obvykle se tvarové frézování rozděluje podle počtu os obráběcího stroje. Tvarovou plochu lze vyrobít v případě, že stroj má tři až více os.

Frézování za pomoci 3osého obráběcího stroje se nazývá kopírovací frézování. Stroje umožňují, aby se nástroj mohl pohybovat současně ve třech směrech. Při obrábění tvarové plochy nástrojem se zaobleným, kulovým nebo kruhovým profilem bříty, dochází vlivem

velikosti kroku přejezdu, ke vzniku výstupku na obrobené ploše viz Obr. 2.3. Četnost a velikost výstupků ovlivňuje kvalitu výsledného povrchu. Největší vliv má dokončovací proces obrábění, při kterém lze velikost výstupku ovlivnit jemností kroku přejezdu, který má ovšem vliv i na obráběcí čas.²¹



Obr. 2.3 Obrábění tvarové plochy: a) nástrojem s kulovým profilem břitu, b) nástrojem se zaobleným profilem břitu²¹

Víceosé frézování tvarových ploch je obrábění, které lze zhotovit v případě, že stroj může vykonávat pohyb více než tří os. Nejčastějšími stroji pro víceosé frézování jsou 5osé frézovací centra. 5osé frézování je velice progresivní technologie CNC obrábění tvarových ploch, díky možnosti pohybu současně 5ti os. Tento pohyb lze realizovat natáčením vřeteníku, natáčením obrobku, nebo kombinací natáčení vřeteníku a obrobku. Díky tomu je možné obrábět plochy téměř s jakoukoliv orientací. Aplikací 5osého obrábění, lze docílit obrobení tvarových částí, které nelze zhotovit klasickým 3osým obráběním. Mezi takové části patří zejména složité drážky, kapsy a tvary které jsou v tzv. podkosu. Velkou předností 5osého obrábění je možnost vyrábět složité tvarové plochy bez nutnosti měnit upnutí obrobku nebo nulový bod obrábění. Osa nástroje se plynule mění tak, aby bylo dosaženo obrobení celého tvaru při zachování požadované kvality povrchu. Další výhodou je možnost zkrátit vyložení nástrojů, což vede lepší kvalitě povrchu a prodloužení životnosti nástrojů.²¹

Čím větší a složitější je obráběný tvar, tím víc je potřeba klást důraz na přípravný proces. Celý obráběcí proces by měl být rozdělen na minimálně tři typy operací: ³¹

- hrubování/lehké hrubování,
- polodokončování,
- dokončování.

Dokončovací operace je vhodné provádět na čtyřosých nebo pětiosých obráběcích strojích s moderním softwarem a technikami programování. Díky tomu lze výrazně snížit, či dokonce eliminovat čas potřebný pro ruční dokončovací výrobu. V konečném důsledku bude mít výrobek lepší geometrickou přesnost a vyšší kvalitu struktury povrchu. ³¹



Obr. 2.4 Příklad tvarového frézování ³¹

2.2.2 Strategie stanovení dráhy nástroje

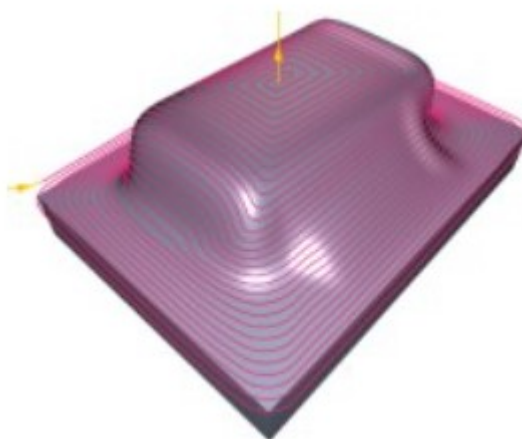
Hlavní strategie používané pro frézování tvarově složitých ploch je **konturování s konstantní hodnotou v ose Z** a **konturování pomocí šroubovicové interpolace**. Obě strategie jsou rozdílné a každá z nich má určité specifikace, které zvýhodňují její uplatnění.³¹

Konturování s konstantní hodnotou v ose Z, dvouosé³¹

Použití: *Hrubování až dokončování*

Konturovací frézování po vrstevnici s konstantní hodnotou v ose Z:

- běžně využívaný postup, je-li k dispozici CAM funkce pro kontrolu maximální výšky nerovnosti povrchu,
- plynulý vstup a výstup ze záběru,
- snadné programování,
- široký sortiment nástrojů.



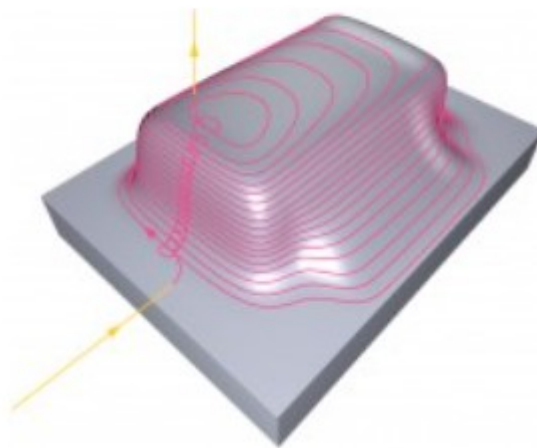
Obr. 2.5 Konturovací frézování po vrstevnici s konstantní hodnotou na ose Z³¹

Konturování pomocí šroubovicové interpolace, tří až pětiosé ³¹

Použití: *Dokončování*

Konturování se současným postupným zahlubováním:

- plynulé změny směrů pohybu,
- dobrá tvarová přesnost a kvalita obrobeného povrchu,
- kontrolovaná výška nerovností povrchu,
- konstantní velikost záběru,
- krátké programy,
- krátké nástroje.



Obr. 2.6 Konturování se současným postupným zahlubováním ³¹

2.2.3 Hrubování zápustek


Cílem hrubování je hospodárně co nejrychleji odebrat co největší objem materiálu, a současně se tvarově přiblížit k finálnímu tvaru. Velmi často je dosahováno výrazně lepšího přiblížení k cílové tvarové kontuře pomocí nástrojů se zaobleným nebo kruhovým tvarem břitu. Obrábění s takovým tvarem ostří je však náročnější z hlediska zajištění procesní spolehlivosti. Hrubování je nejčastěji realizováno pomocí frézovacích hlav s VBD. VBD s tvarem čtvercovým nebo kosočtvercovým se špatně přizpůsobují cílové kontuře a vznikají poměrně velké radiální síly, které nepříznivě ovlivňují obrobený povrch.

Významným předpokladem při frézování zápustkových ocelí je kontinuální a sousledný záběr zubu frézy. Dráhy musí být voleny tak, aby nedocházelo ke krátkým a prudkým

stoupáním či klesáním. V případě vyšších rychlostí frézování se osvědčila metoda tzv. kapsování, při kterém se kontura zhotovuje postupně ve spirálových drahách.

Při frézování materiálu v rozích je kromě strategie nutné optimalizovat také způsob najíždění břitu do řezu. V případě otevřených kontur nejvíce závisí na optimálním poloměru přiblížení. V případě uzavřených kontur se nejčastěji využívají tzv. plochého najetí pod určitým uhlím při sníženém posuvu neboli tzv. rampování.³²

Tab. 2.2 Příklady nástrojů používaných pro hrubování se zaoblenou geometrií³¹

		
	S kruhovými VBD	S Kulovým čelem, s VBD
Velikost stroje/vřetena	ISO 40, 50	ISO 40, 50
Požadavek na stabilitu	Vysoké	Střední
Hrubování	Velmi dobré	Dobré
Dokončování	Přijatelné	Přijatelné
Hloubka řezu a_p	Střední	Střední
Produktivita	Velmi dobré	Dobré

2.2.4 Dokončování

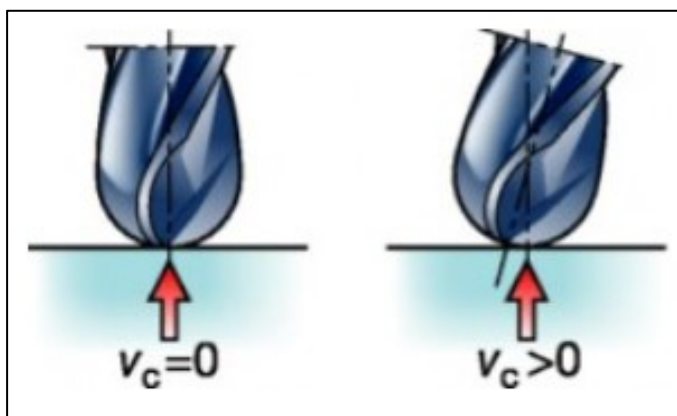
K optimalizaci dokončovacího obrábění bylo vyvinuto mnoho frézovacích strategií, které jsou voleny v závislosti na tvaru dokončovaných ploch. Nejprve mohou být obrobny přechodové plochy a plochy, které na ně navazují směrem nahoru, a to vrstevnicovým způsobem. Při tom mohou být obrobny i překrývající plochy ve směru vrstevnic, čímž jsou zachovány kontinuální dráhy nástroje s konstantními záběrovými podmínkami. Pro plochy, jejíž sklon je velmi malý, nebo téměř nulový, je výhodnější použít spirálové frézování, při kterém lze rovněž zachovat konstantní záběrové podmínky. Je nutné se vyvarovat prudkým změnám směru pohybu nástroje a záběrových podmínek i tzv. mrtvým bodům.

Při obrábění části zápusťek, které umožňují použití velkých rozměrů nástrojů, lze dosáhnout nízkých strojních časů při velmi dobré trvanlivosti břitu nástroje.

Zásadou pro obrábění šikmých ploch v případech, kdy není vhodné použít ani jednu z dříve zmiňovaných strategií, je využití, co největší řezné rychlosti na nástroji, kterou lze dosáhnout správnou orientací nástroje vůči obráběné ploše. Proto je nutné programovat pohyb nástroje tak, aby maximální tloušťka odebírané vrstvy byla odebíraná co největším průměrem nástroje ve směru osy rotace. Těmto problémům lze předcházet pomocí 5tiosého řízení nakláněním (vlečením) nástroje, a tím se vyhnout slabému místu kulových fréz, kterým je střed s nulovou řeznou rychlostí viz Obr. 2.7.³²

Tab. 2.3 Příklady nástrojů používaných pro dokončování³¹

		
	S kulovým čelem, s výměnnými hlavicemi	S kulovým čelem, celokarbidové
Velikost stroje/vřetena	ISO 30, 40	ISO 30, 40
Požadavek na stabilitu	Střední	Nízké
Hrubování	Přijatelné	Přijatelné
Dokončování	Velmi dobré	Velmi dobré
Hloubka řezu a_p	Malé	Malé
Produktivita	Dobré	Dobré



Obr. 2.7 Eliminace nulové řezné rychlosti pomocí naklonění nástroje³¹

2.3 Moderní způsoby výroby zápusťek

Mezi méně používané způsoby výroby kovacích zápusťek patří vysokorychlostní obrábění a elektroerozivní obrábění. Oba tyto způsoby jsou technologicky náročnější než běžný způsob výroby obráběním, ovšem jejich použití přináší mnohem vyšší efektivitu výroby, popřípadě výrobní možnosti, které nelze jinou metodou nahradit. Pro srovnání vysokorychlostního frézování a elektroerozivního obrábění slouží Tab. 2.4.³³

Tab. 2.4 Porovnání elektroerozivního obrábění s vysokorychlostním obráběním³³

	Elektroerozivní obrábění	Vysokorychlostní obrábění
Maximální přesnost	2–10 μm	5–10 μm (třiosé), 10–20 μm (pětiosé)
Proces (nástroj, obrobek)	Bezkontaktní obrábění	Kontaktní obrábění
Maximální tvrdost materiálu k obrábění	Není omezená	60–65 HRC
Minimální rádius v rohu	Bez rádiusu	0,2 mm, při přeostržení možnost 0,1 mm

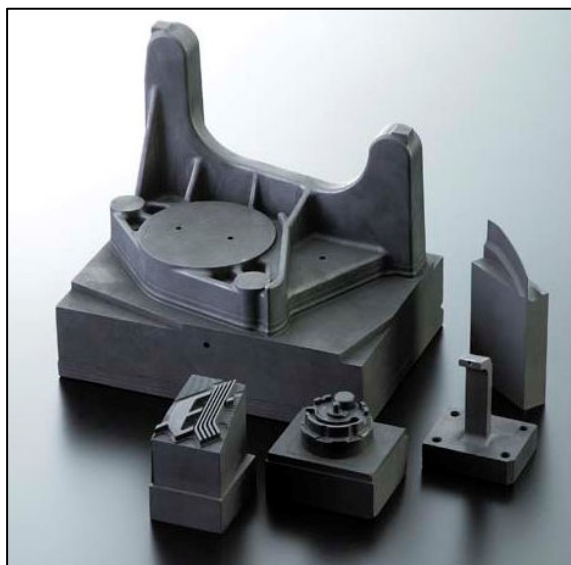
2.3.1 Elektroerozivní obrábění

Při elektroerozivním obrábění dochází k úběru materiálu na základě eroze. Principem metody jsou po sobě jdoucí elektrické výboje. Výboje vznikají mezi anodou (nejčastěji tvořena nástrojovou elektrodou) a katodou (nejčastěji tvořenou obrobkem) ponořenou v dielektriku, což je kapalina vyznačující se vysokým elektrickým odporem. Ta usnadní usměrnění toku elektrických výbojů, které se nacházejí v mezeře mezi obrobkem a elektrodou. Elektroda se tedy nedotýká obrobku. Na základě krátkých proudových výbojů je obráběný materiál natavován a prouděním kapaliny odplaven pryč z míst obrábění. Tímto způsobem se obrobek opracovává do požadovaného tvaru.

Elektroerozivní obrábění je pro výrobu zápusťek výhodné především kvůli možnostem obrábět velmi tvrdé materiály s velkou přesností a kvalitou povrchu. Pro výrobu zápusťek je používáno elektrojiskrové hloubení. Jedná se o základní metodu elektroerozivního obrábění. Stroje používané pro hloubení se nazývají hloubičky. Moderní hloubičky mají všechny činnosti řízeny CNC řídicím systémem. Díky tomuto řízení je možný i bezobslužný provoz.

Nástrojem těchto hloubiček jak už bylo zmíněno je elektroda. Každá elektroda se pro určité operace vyrábí samostatně. Náklady na jejich zhotovení bývají

až 50 % z celkových nákladů. Elektroda se vyrábí nejčastěji z mědi, ale je možné ji vyrobit i z jiných materiálů jako např. mosaz, grafit. Materiál elektrody se volí na základě materiálu obrobku, použitého stroje a relativního objemového opotřebení nástrojové elektrody. Nástroj je zhotoven do inverzního tvaru, než má zápustka. Často se používá jen jeden nástroj, který je schopen zhotovit celou formu. Díky možnostem CNC řízení je ovšem výhodné rozdělit celkový tvar formy na jednodušší tvary, které jsou snadněji vyrobitelné s vyšší přesností. Další možností CNC řízení při zjednodušování tvaru nástroje je možnost vhodnou kombinací tvaru a pohybu elektrody vyrobit tvarově velmi složité dutiny.^{33, 34}



Obr. 2.8 Příklad různých grafitových elektrod (35)

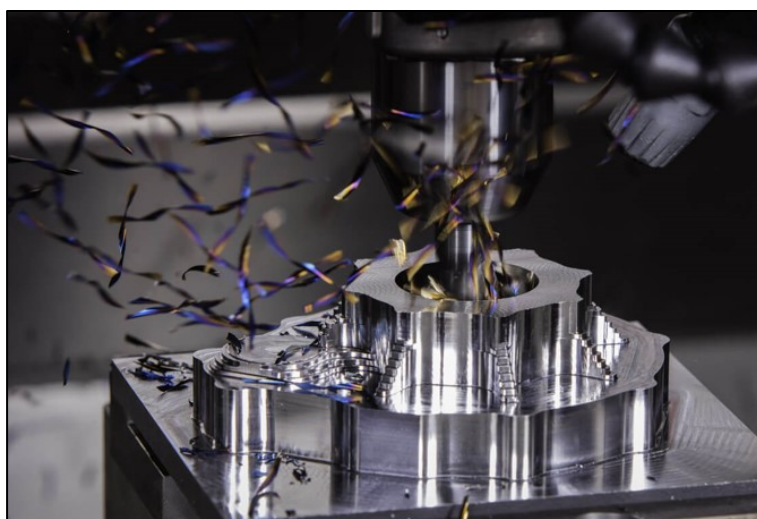
2.3.2 Vysokorychlostní frézování

Podstata vysokorychlostního frézování spočívá především v dosahování kratších strojních časů, při současném zvýšení přesnosti a kvality složitých tvarových ploch. Tohoto požadavku se dosahuje prostřednictvím vysokých řezných rychlostí v_c a velmi vysokého posuvu na zub f_z . Zvýšená řezná rychlost znamená vyšší teplotu v místě řezu. Zvýšená teplota způsobuje úbytek řezných složek, a tím se snižuje celkové síly obrábění. Proto se při vysokorychlostním frézování nepoužívá chladicí médium, které by znehodnocovalo obráběcí proces. Vysoká teplota v místě řezu dále způsobuje velké přenesení tepla do samotné třísky, což znamená, že obrobek se méně zahřívá. Menší zahřátí obrobku při obráběcím procesu znamená menší tepelnou roztažnost a zlepšení celkové přesnosti obrábění.

Vysokorychlostní obrábění vyvíjí nároky na celou řadu faktorů. Pro celkové zvládnutí technologie vysokorychlostního obrábění je potřeba dbát na stroj, nástroj, CAD/CAM strategie a materiál obrobku.

Hlavní požadavky na stroj pro vysokorychlostní frézování jsou kladeny na vřeteno. Vřeteno musí být schopné zajistit velmi vysoké otáčky. Kromě vysokých otáček, musí také zajišťovat plynulý chod a dostatečně vysoký krouticí moment. Další požadavek na vřeteno je dostatečně přesný systém upínání nástrojů. S vysokými otáčkami vřetena a posuvem na zub souvisí další parametr, a to pracovní rychlost posuvu stroje. Pohony stroje musí zajistit extrémní hodnoty zrychlení a zpždění. Pohony dále musí být schopné tlumit kmity vzniklé obráběcími operacemi.

Na nástroje pro vysokorychlostní frézování jsou kladeny nároky nejen kvůli samotné metodě obrábění, ale i kvůli materiálu obrobku. Jak již bylo zmíněno, materiály používané pro zápustky jsou velice tvrdé a pevné. Při obrábění takových materiálu dochází k tomu, že s rostoucí řeznou rychlostí roste i přetvárný odpor. Proto musí být mechanické zatížení břitu sníženo redukcí přísmvu a posuvu na zub. Radiální přísmv by neměl u vysokorychlostního frézování zápustek překračovat v zájmu hospodárnosti 5 až 10 % průměru nástroje. Obecně platí zásada: Čím vyšší volená řezná rychlost, tím je nutný nižší přísmv. Vzhledem k rotačnímu pohybu nástroje, obráběcímu při velmi vysokých otáčkách, rozpínaného odstředivou silou, tepelně zatíženého a pevnostně mimořádně namáhaného, se vyžaduje krom vysokých fyzikálních a mechanických vlastností také geometrická přesnost a homogenita struktury nástroje. Homogenita struktury je důležitá z hlediska rozložení hmoty, které by mohlo vést k rozkmitání nástroje.²¹



Obr. 2.9 Vysokorychlostní frézování za použití technologie iMachining³⁶

3. Návrh výroby kovací zápustky

Výroba kovacích zápustek je často technologicky velmi náročná. I v případě zkušených technologů může dojít při obráběcím procesu ke komplikacím, které by mohly ovlivnit finální kvalitu obrobené zápustky. Při výrobě tvarově složitějších zápustek, se proto volí jiný materiál, než materiál zvolený pro kovací zápustku. Tyto materiály mají jiné vlastnosti než nástrojová ocel a slouží k výrobě prototypové zápustky, na které se vyzkouší zvolené nástroje a strategie výroby. Všechny použité nástroje mají geometrii vhodnou pro kalenou nástrojovou ocel. Jelikož geometrie nástrojů je volena s ohledem na kalenou nástrojovou ocel, snažíme se, aby materiál prototypové zápustky byl obrobitelný nástroji použitými pro kalenou nástrojovou ocel.

Po vyrobení prototypové zápustky přichází na řadu výroba z oceli zvolené pro kovací zápustku. Pro tuto ocel je technologický postup stejný jako pro prototypovou zápustku. Nemění se ani zvolené strategie. Se změnou materiálu polotovaru se ovšem mění řezné podmínky.

Následující kapitola se bude zabývat výrobou prototypové zápustky. Vždy budou popsány řezné podmínky, které byly použity při výrobě zkušební zápustky a řezné podmínky, které by byly použity pro výrobu kovací zápustky.

3.1 Materiál a polotovar pro výrobu

Materiál prototypové zápustky a materiál vhodný pro výrobu kovací zápustky mají odlišné chemické složení i mechanické vlastnosti. Přesto materiál prototypové zápustky musí být obrobitelný nástroji, vhodnými pro kalenou ocel. Jako materiál prototypové zápustky se proto volí buď ocel, nebo slitiny materiálu s podobnými vlastnostmi pro obrábění. Často se používají různé slitiny hliníku.

3.1.1 Materiál pro výrobu zkušební vzorku

Jako materiál pro výrobu prototypové zápustky byl zvolen EN AW-6082 T6. Jedná se o hliníkovou slitinu s hořčíkem, křemíkem a manganem. Tento materiál je vhodný pro výrobu prototypové zápustky díky své obrobitelnosti a mechanickým vlastnostem. Díky svému chemickému složení a mechanickým vlastnostem lze tento materiál obrábět nástroji vhodnými pro obrábění kalené oceli.³⁷

Tab. 3.1 Označení a mechanické vlastnosti slitiny EN AW-6082 T6 ³⁷

Mezinárodní označení	Chemický symbol	Stav	Minimální staticko-mechanické parametry			
			Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Tažnost A_5 [%]	Tvrdość $HBW_{2,5/62,5}$
EN AW-6082	AlSi1MgMn	T6	340	300	10	100

3.1.2 Materiál pro výrobu kovací zápustky

Pro výrobu kovací zápustky byla zvolena dle EN 10027-2 ocel: 1.2343. Jedná se o středně legovanou chrom-molybden-vanadovou ocel pro práci za tepla. Používá se pro výrobu velmi namáhaných nástrojů při práci za tepla, jako lisovací trny a matrice, nástroje na protlačování, nástroje pro tlakové lití, lisovací nářadí a vložky zápustek. Ocel se vyznačuje velmi dobrou makro a mikro čistotou, dobrou obrobiteľností a lešitelností. Chemické a mechanické vlastnosti oceli viz Tab. 3.2, Tab. 3.3. ³⁸

Tab. 3.2 Chemické složení tavby v hmot. % podle DIN 17 350 ³⁸

C	Si	Mn	Cr	Mo	V
0,33-0,41	0,80-1,20	0,25-0,50	4,80-5,50	1,10-1,50	0,30-0,50

Tab. 3.3 Mechanické vlastnosti oceli ³⁸

Označení dle EN 10027-2	Mez pevnosti R_m [MPa]	Mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Maximální tvrdost HB
1.2343	1150	950	310

3.1.3 Polotovár zápustky

Rozměry polotovaru obecně vycházejí z výkresové dokumentace viz Příloha A. Jelikož zápustka má kruhový průřez, byl zvolen polotovár z kruhové tyče. Maximální průměr zápustky je 300 mm. Maximální výška zápustky je 117 mm.

Zvolený rozměr polotovaru: Ø 320 x 130 dle ČSN EN 755-1

3.2 Příprava výroby

Příprava výroby je velmi důležitá část výrobního procesu. Navrhujeme zde celý technologicky postup od výběru vhodného stroje, upnutí až po nástroje. Je zde kladen důraz i na samotnou analýzu kritických míst zápustky, jako jsou ostré hrany, nebo rádiusy.

3.2.1 Volba stroje

Pro obrábění těžkoobrobitelných materiálů a tvarově složitých výrobků, se doporučuje použití stroje s vysokým výkonem a tuhostí konstrukce. V případě velmi složitých tvarových ploch, je nezbytné použít stroj s více než třemi osami. Pro frézování formy byla zvolena univerzální CNC frézka s naklápěcím rotačním stolem od společnosti DMG MORI s označením DMU 50 viz Obr. 3.1. Konstrukce zvoleného frézky splňuje veškeré požadavky potřebné pro výrobu kovací zápustky. Parametry stroje viz Tab. 3.4.



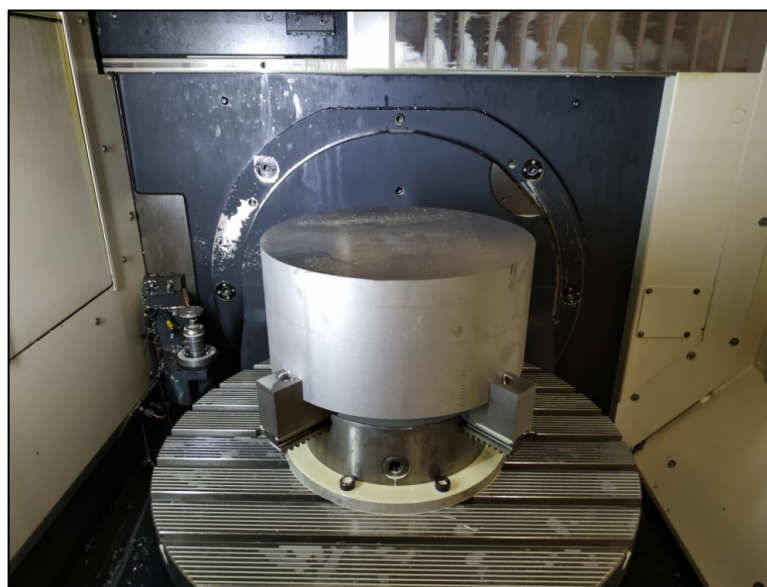
Obr. 3.1 Katalogová fotografie CNC DMU 50 ³⁹

Tab. 3.4 Parametry frézky DMU 50 ³⁹

Základní parametry		
Řídicí systém		Heidenhain iTNC 530
Maximální výkon		21 kW
Rozjezd	X	500 mm
	Y	450 mm
	Z	400 mm
Upínací plocha stroje		700 x 500 mm
Počet nástrojů v zásobníku		30

3.2.2 Volba upnutí

Jelikož je polotovar kruhového průřezu, nejvhodnější způsob upnutí je upnutí do sklíčidla. Bylo vybráno čtyřčelist'ové sklíčidlo, s měkkými čelistmi. Měkké čelisti byly zvoleny kvůli ideálnímu rozsahu upnutí, a také pro lepší kontakt s plochou polotovaru. Čelisti byly frézovány na průměr 315 mm do hloubky 40 mm. Veškeré upínání při frézování bylo zhotoveno za pomoci tohoto sklíčidla. Upnutí polotovaru lze vidět na Obr. 3.2



Obr. 3.2 Upnutí polotovaru

3.2.3 Analýza modelu

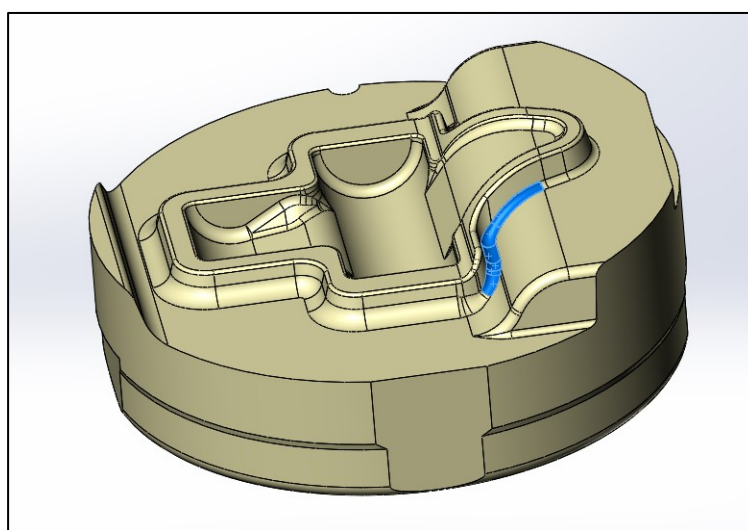
Při výrobě složitých tvarových ploch je nezbytné správně analyzovat model zápustky. Analýza modelu je realizována postupně od největších ploch po nejmenší. Při analýze modelu se postupně navrhuje i technologický postup. Nejprve se navrhuje počet upnutí nezbytných pro výrobu, poté samotné operace obrábění.

Další částí analýzy modelu je vyhledávání a analyzování kritických míst. Jsou to taková místa, kde lze předpokládat, že mohou nastat komplikace při samotné výrobě. Jsou vyhledávány ostré hrany, hluboké dutiny a celkově se analyzují rádiusy vnitřních kapes.

V modelu výrobní kovací zápustky se nenachází žádná výrazná kritická místa. Jako kritické místo byla označena drážka s nejmenším rádiusem (dále „místo č. 1“) viz Obr. 3.3 a rádiusová kapsa (dále „místo č. 2“) viz Obr 3.4

Místo č. 1

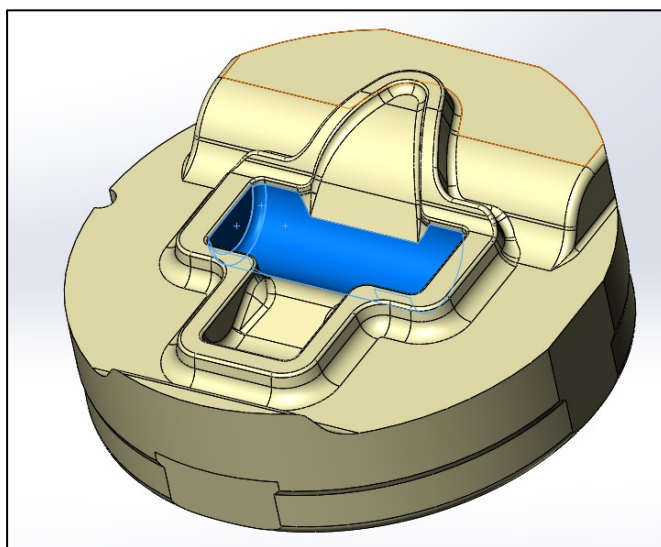
V tomto místě je zapotřebí velkého vysunutí nástroje. Nelze zde efektivně naklopit osy tak, aby bylo možné zmenšit vysunutí nástroje z držáku. Zároveň je to místo s nejmenším vnitřním rádiusem, což znamená, že pro výrobu tohoto rádiusu bude použit nástroj s malým průměrem. Příliš velké vysunutí nástroje z držáku a malý průměr nástroje, může mít nepříznivý vliv na obráběcí proces, zvláště kvůli riziku vzniku vibrací. Dále hrozí riziko příliš velkého opásání nástroje, což může také vést k vibracím.



Obr. 3.3 Místo č. 1

Místo č. 2

Místo je kritické kvůli své hloubce a malému rádiusu v rozích. Je zde také potřeba velkého vysunutí nástroje s malým průměrem, což může mít za následek vznik vibrací. Ovšem oproti místu č.1 je zde možnost naklopení os tak, aby se zmírnilo vysunutí nástroje z držáku. Dalším problémem může být dokončování spodní části kapsy. Zde může nastat situace, že budou zřetelné stopy po obrábění zvláště v místech rádiusového rohu.



Obr. 3.4 Místo č. 2

3.2.4 Volba nástrojů

Po volbě stroje, vhodného upnutí a analýze modelu lze navrhnout řezné nástroje, které budou použity pro procesy hrubování až po procesy dokončení. Společným znakem nástrojů vhodných pro výrobu tvarově složitých ploch je zaoblený, nebo kruhový tvar břitu. Není příliš vhodné používat nástroje s ostrou špičkou na břitu.

Pro výrobu formy bylo použito 8 nástrojů. Všechny nástroje budou popsány za pomoci katalogu nástrojů společnosti Seco Tools CZ, s.r.o, nebo katalogu nástrojů společnosti Dormer Pramet s.r.o. Nástroje a nástrojové materiály jsou vybrány na základě materiálu kovací zápusťky, tedy jsou vhodné pro obrábění oceli 1.2343.

Čelní fréza D52 ⁴⁰

Označení: R220.29I-0052-06.5A



Obr. 3.5 Čelní fréza D52

Tab. 3.5 Základní parametry čelní frézy D52 ^{40, 41}

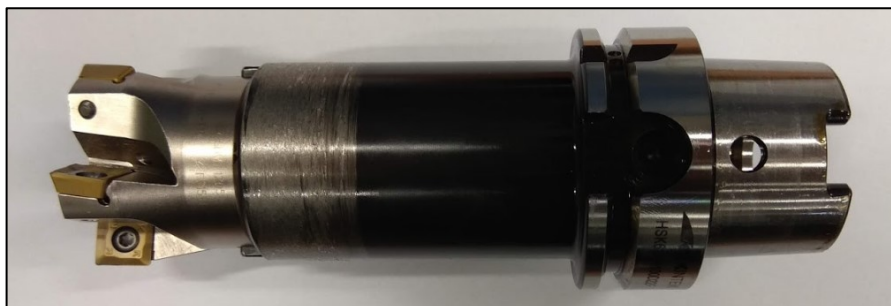
Fréza		
Obráběcí průměr	D	40 mm
Maximální obráběcí průměr	D_{max}	52 mm
Maximální hloubka řezu v čelním posuvu	$a_{p\ max}$	6 mm
Počet efektivních obvodových břitů	z	5
VBD		
Označení	RPHT1204M0T-6-M08 F40M	
Materiál	Slinutý karbid	
Průměr destičky	12 mm	
Tloušťka destičky	4,76 mm	



Obr. 3.6 Katalogová fotografie VBD: RPHT1204M0T-6-M08 F40M ⁴¹

Rohová fréza D50 ⁴²

Označení: 50A05R-S90SD12-C



Obr. 3.7 Rohová fréza D50

Tab. 3.6 Základní parametry rohové frézy D50 ^{42, 43}

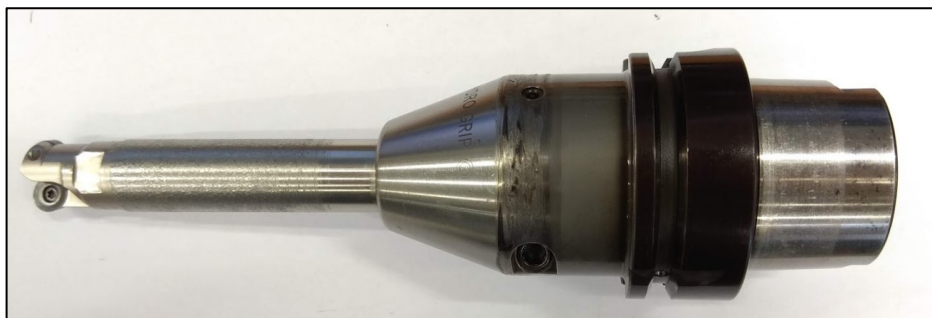
Fréza		
Obráběcí průměr	D	50 mm
Maximální obráběcí průměr	D_{max}	50 mm
Maximální hloubka řezu v čelním posuvu	$a_{p\ max}$	10 mm
Počet efektivních obvodových břitů	z	5
VBD		
Označení	SDMT 120508SR-F	
Materiál	Slinutý karbid	
Průměr destičky	12 mm	
Tloušťka destičky	5 mm	



Obr. 3.8 Katalogová fotografie VBD: SDMT 120508SR-F ⁴³

Čelní fréza D20⁴⁴

Označení: R217.29-1020.RE-05.2A



Obr. 3.9 Čelní fréza D20

Tab. 3.7 Základní parametry čelní frézy D20^{44, 45}

Fréza		
Obráběcí průměr	D	10 mm
Maximální obráběcí průměr	D_{max}	20 mm
Maximální hloubka řezu v čelním posuvu	$a_{p\ max}$	5 mm
Počet efektivních obvodových břitů	z	2
VBD		
Označení	RDHT10T3M0T-M05 F40M	
Materiál	Slinutý karbid	
Průměr destičky	10 mm	
Tloušťka destičky	3,97 mm	



Obr. 3.10 Katalogová fotografie VBD: RDHT10T3M0T-M05 F40M⁴⁵

Stopková fréza D12 ⁴⁶

Označení: 553120R310Z3.0-SIRON-A



Obr. 3.11 Stopková fréza D12

Tab. 3.8 Základní parametry stopkové frézy D12 ⁴⁶

Fréza		
Obráběcí průměr	D	12 mm
Maximální obráběcí průměr	D_{max}	12 mm
Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu	$a_{p\ max}$	26 mm
Počet efektivních obvodových břitů	z	3
Rohový rádius	r	3,1 mm

Stopková fréza D8 ⁴⁷

Označení: 553080R050Z3.0-SIRON-A



Obr. 3.12 Stopková fréza D8

Tab. 3.9 Základní parametry stopkové frézy D8 ⁴⁷

Fréza		
Obráběcí průměr	D	8 mm
Maximální obráběcí průměr	D_{max}	8 mm
Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu	$a_{p\ max}$	18 mm
Počet efektivních obvodových břitů	z	3
Rohový rádius	r	0,5 mm

Stopková fréza D4⁴⁸

Označení: 553040R020Z3.0-SIRON-A



Obr. 3.13 Stopková fréza D4

Tab. 3.10 Základní parametry stopkové frézy D4⁴⁸

Fréza		
Obráběcí průměr	D	4 mm
Maximální obráběcí průměr	D_{max}	4 mm
Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu	$a_{p\ max}$	10 mm
Počet efektivních obvodových břitů	z	3
Rohový rádius	r	0,5 mm

Stopková kulová fréza D10⁴⁹

Označení: JS534100D1B.0Z4-NXT



Obr. 3.14 Stopková kulová fréza D10

Tab. 3.11 Základní parametry kulové frézy D10⁴⁹

Fréza		
Obráběcí průměr	D	10 mm
Maximální obráběcí průměr	D_{max}	10 mm
Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu	$a_{p\ max}$	30 mm
Počet efektivních obvodových břitů	z	4
Rohový rádius	r	5 mm

Stopková kulová fréza D6⁵⁰

Označení: JS532060D1B.0Z2-NXT



Obr. 3.15 Stopková kulová fréza D6

Tab. 3.12 Základní parametry kulové frézy D6⁵⁰

Fréza		
Obráběcí průměr	D	6 mm
Maximální obráběcí průměr	D_{max}	6 mm
Maximální hloubka řezu v bočním směru posuvu	$a_{p\ max}$	12 mm
Počet efektivních obvodových břitů	z	2
Rohový rádius	r	3 mm

3.3 Výroba formy frézováním

Po přípravě výroby přichází na řadu samotná výroba. Výroba se skládá ze dvou hlavních částí, a to ze zhotovení CNC programu a ze samotné výroby na CNC stroji.

Jak již bylo mnohokrát napsáno, výroba kovacích zápustek je často technologicky velmi náročná, a proto výroba složitějších ploch formy rozděluje na určité části. Tyto části jsou rozděleny buď pomocí nástrojů, nebo operacemi, které nástroje vykonávají. V praxi to znamenalo, že se technologický postup výroby složitých ploch rozdělil podle operací nástrojů. Vždy se tedy programovaly dráhy obrábění jednoho nástroje. Po naprogramování se program převedl do CNC stroje a bylo zhotoveno obrábění daným nástrojem. Poté se programovaly dráhy dalšího nástroje. Tímto postupem bylo docíleno přehlednosti výroby. V případě chyb v CNC programu bylo jednodušší chybu analyzovat a opravit.

Pro naprogramování obrábění byl použit CAM program MASTERCAM 2018. V tomto programu byly navrženy všechny dráhy obrábění.

3.3.1 Technologický postup a výroba 1. strany

Tab. 3.13 Seznam operací obrábění 1. strany

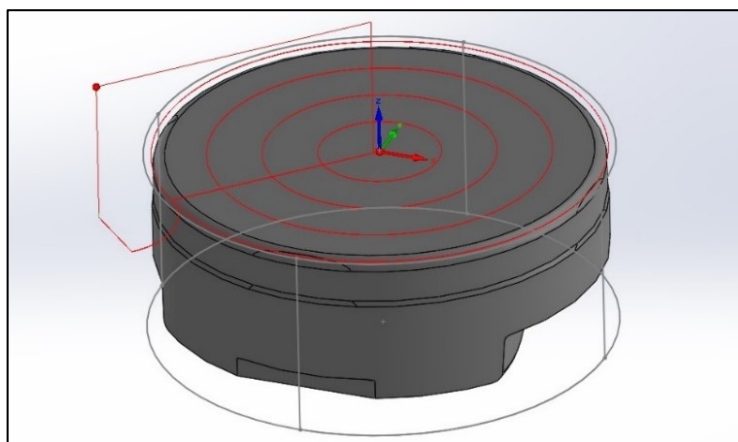
Seznam operací			
Pořadí	Operace	Čas výroby	
		Slitina EN AW-6082	Ocel 1.2343
1.	Obrábění čela	4 min	*22 min
2.	Obrábění obvodu	15 min	*106 min
3.	Řádkování zkosení	7 min	*31 min
4.	Řádkování zaoblení	10 min	*75 min
5.	Frézování bočních ploch	5 min	*34 min
6.	Frézování půlkruhového vybrání	2 min	*12 min

Pozn: *časy výroby pro ocel 1.2343 byly stanoveny přibližně dle porovnání rychlosti posuvů a hloubky třísky.

1. Obrábění čela

Tab. 3.14 Parametry obrábění čela

Nástroj	Čelní fréza D52	
Vyložení nástroje	-	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	400 m·min ⁻¹	50 m·min ⁻¹
f_z	0,12 mm	0,2 mm
a_p	2 mm	1,5 mm
a_e	36 mm	36 mm

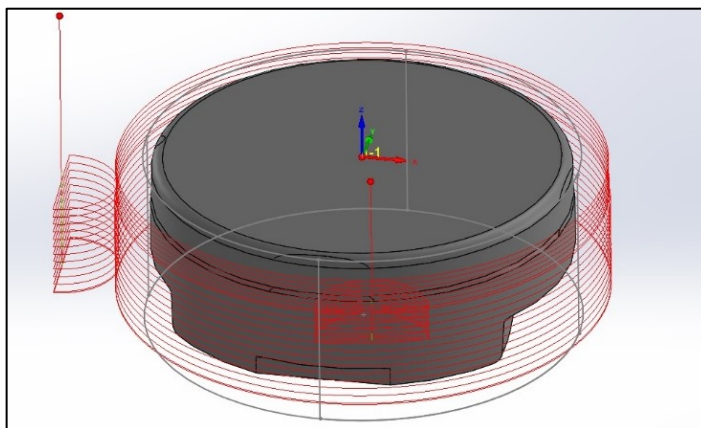


Obr. 3.16 Dráhy obrábění čela

2. Obrábění obvodu

Tab. 3.15 Parametry obrábění obvodu

Nástroj	Čelní fréza D50	
Vyložení nástroje	-	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	400 m·min ⁻¹	50 m·min ⁻¹
f_z	0,2 mm	0,3 mm
a_p	4 mm	3 mm
a_e	[-]	[-]

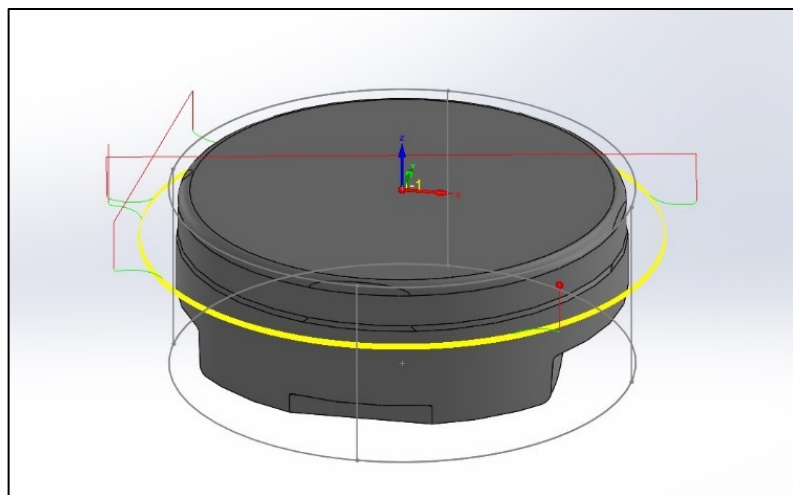


Obr. 3.17 Dráhy obrábění obvodu

3. Řádkování zkosení

Tab. 3.16 Parametry řádkování zkosení

Nástroj	Čelní fréza D50	
Vyložení nástroje	-	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	500 m·min ⁻¹	75 m·min ⁻¹
f_z	0,2 mm	0,3 mm
a_p	0,2 mm	0,2 mm
a_e	[-]	[-]

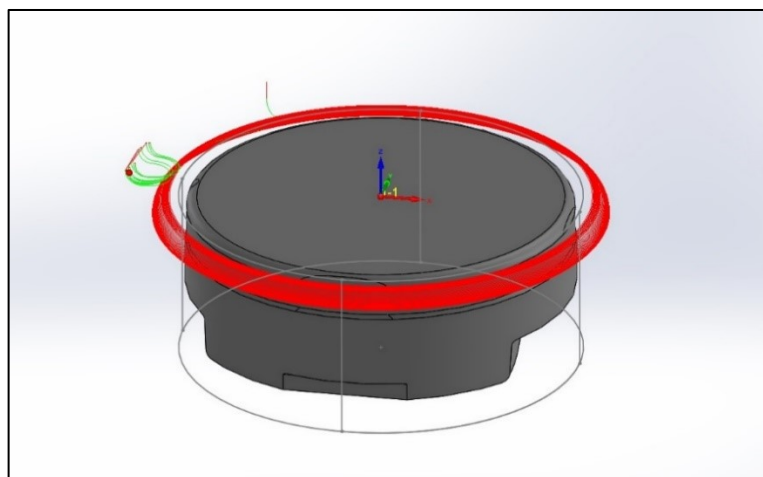


Obr. 3.18 Dráhy řádkování zkosení

4. Řádkování zaoblení

Tab. 3.17 Parametry řádkování zkosení

Nástroj	Čelní fréza D52	
Vyložení nástroje	-	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	$500 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$85 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
f_z	0,2 mm	0,2 mm
a_p	0,2 mm	0,2 mm
a_e	[-]	[-]

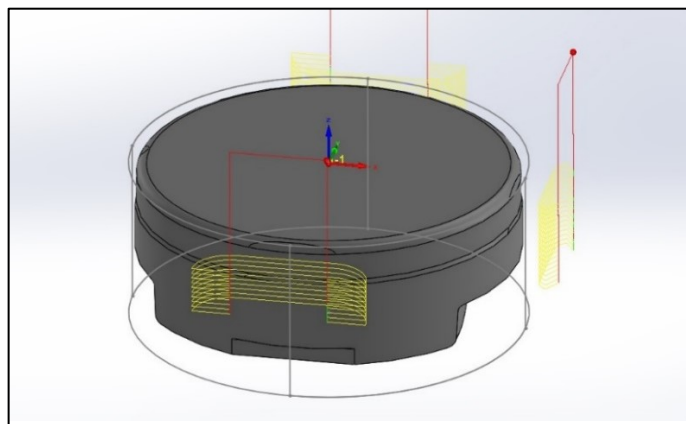


Obr. 3.19 Dráhy řádkování zaoblení

5. Frézování plošek

Tab. 3.18 Parametry frézování plošek

Nástroj	Čelní fréza D52	
Vyložení nástroje	-	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	400 m·min ⁻¹	70 m·min ⁻¹
f_z	0,2 mm	0,25 mm
a_p	4 mm	2,5 mm
a_e	[-]	[-]

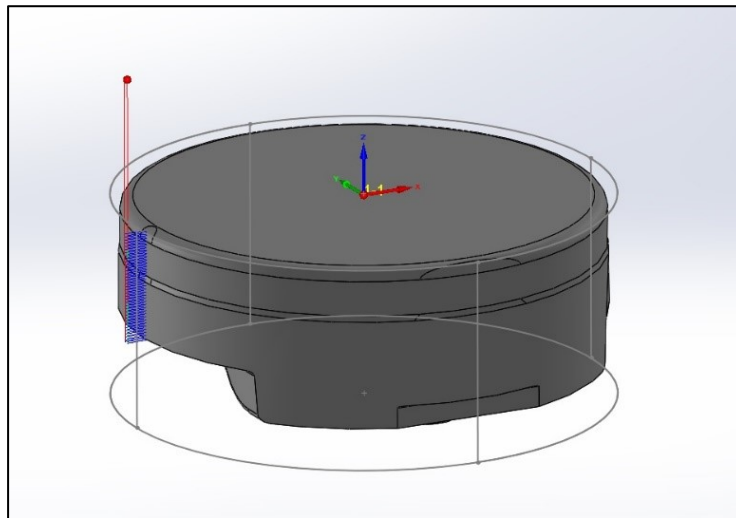


Obr. 3.20 Dráhy frézování plošek

6. Frézování půlkruhové drážky

Tab. 3.19 Parametry frézování půlkruhové drážky

Nástroj	Stopková fréza D12	
Vyložení nástroje	70 mm	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	250 m·min ⁻¹	90 m·min ⁻¹
f_z	0,05 mm	0,03 mm
a_p	1 mm	1 mm
a_e	[-]	[-]



Obr. 3.21 Dráhy obrábění půlkruhové drážky



Obr. 3.22 Obrobená 1. strana

3.3.2 Technologický postup a výroba 2. strany

Tato strana již byla tvarově složitější pro obrábění. Z toho důvodu bude přidán vedle snímku s dráhami taky snímek s přídavky na obrábění. Přídavky v milimetrech jsou barevně rozlišeny dle Obr. 3.23 a Obr. 3.24.



Obr. 3.23 Barevné odlišení přídavku na obrábění (operace č. 1–3)



Obr. 3.24 Barevné odlišení přídavku na obrábění (operace č. 4–9)

Tab. 3.20 Seznam operací obrábění 2. strany

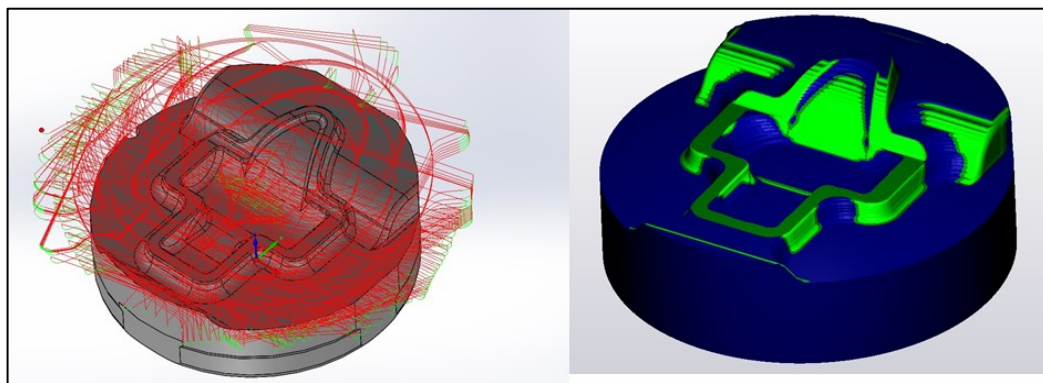
Seznam operací			
Pořadí	Operace	Čas výroby	
		Slitina EN AW-6082	Ocel 1.2343
1.	Hrubování D52	13 min	*161 min
2.	Hrubování D20	15 min	*170 min
3.	Hrubování D12	11 min	*22 min
4.	Hrubování D8	12 min	*24 min
5.	Hrubování D4	9 min	*14 min
6.	Dokončení rovinných ploch	5 min	*26 min
7.	Dokončení dělicí roviny	10 min	*20 min
8.	Dokončení D10	65 min	*110 min
9.	Dokončení D6	7 min	*12 min

Pozn: *časy výroby pro ocel 1.2343 byly stanoveny přibližně dle porovnání rychlosti posuvů a hloubky třísky.

1. Hrubování D52

Tab. 3.21 Parametry hrubování D52

Nástroj	Čelní fréza D52	
Vyložení nástroje	-	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	500 m·min ⁻¹	75 m·min ⁻¹
f_z	0,5 mm	0,25 mm
a_p	2 mm	2
a_e	34 mm	34 mm

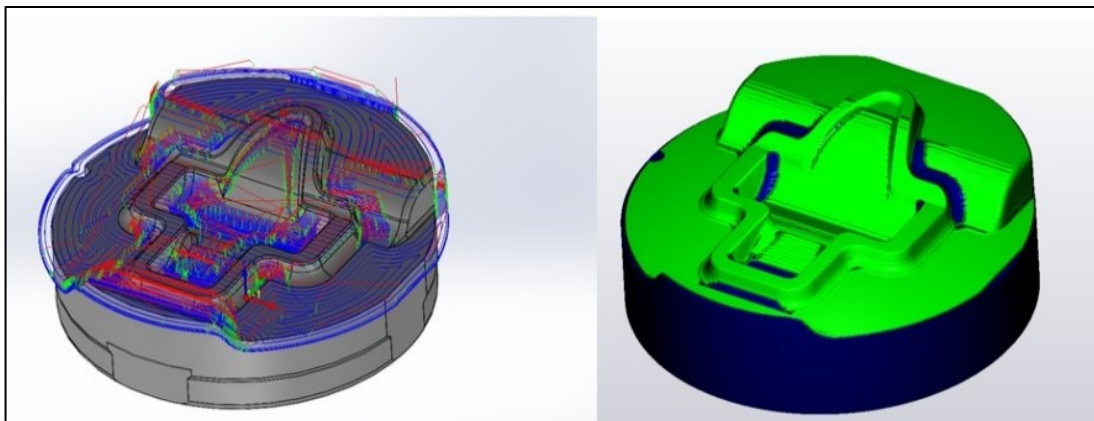


Obr. 3.25 Dráhy hrubování D52, kontrola přídavků po hrubování

2. Hrubování D20

Tab. 3.22 Parametry hrubování D20

Nástroj	Čelní fréza D20	
Vyložení nástroje	-	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	500 m·min ⁻¹	80 m·min ⁻¹
f_z	0,3 mm	0,15mm
a_p	1 mm	1 mm
a_e	5 mm	5 mm

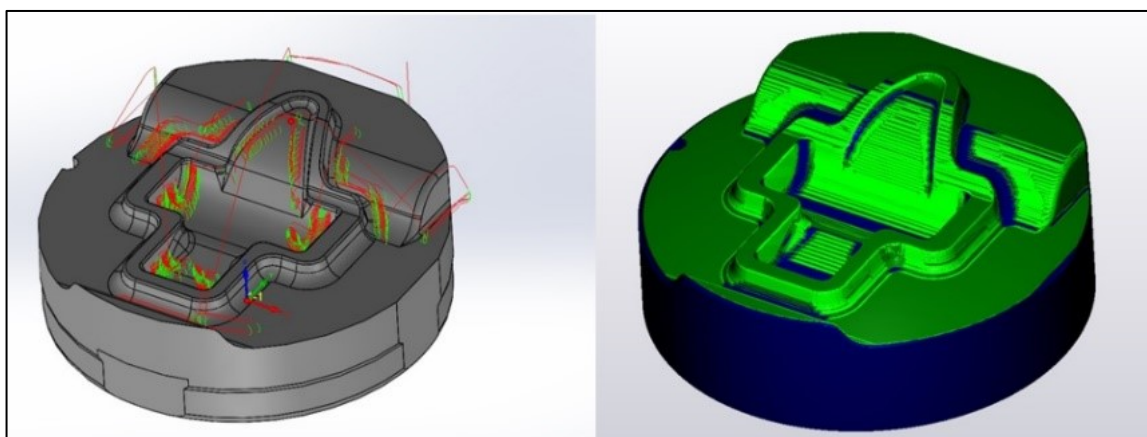


Obr. 3.26 Dráhy hrubování D20, kontrola přidavků po hrubování

3. Hrubování D12

Tab. 3.23 Parametry hrubování D12

Nástroj	Stopková fréza D12	
Vyložení nástroje	45 mm	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	300 m·min ⁻¹	100 m·min ⁻¹
f_z	0,06 mm	0,1
a_p	1 mm	1 mm
a_e	6 mm	6 mm

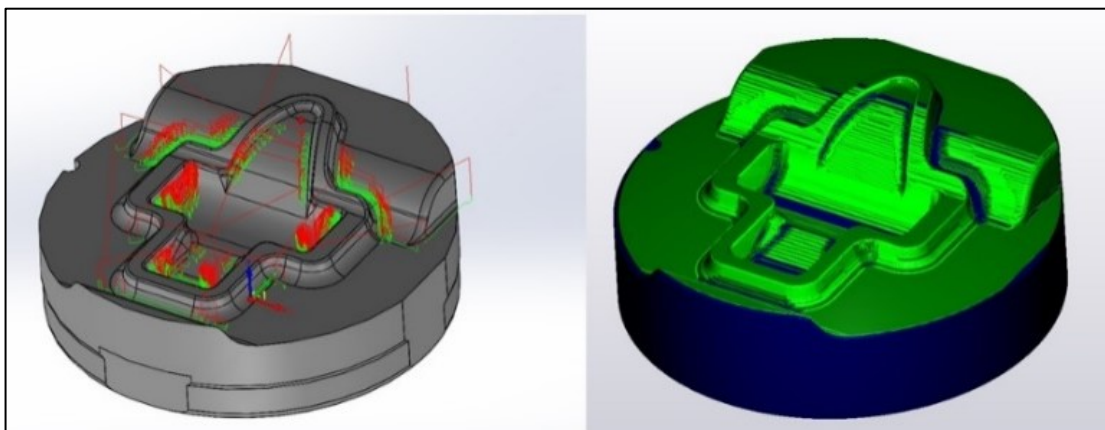


Obr. 3.27 Dráhy hrubování D12, kontrola přidavků po hrubování

4. Hrubování D8

Tab. 3.24 Parametry hrubování D8

Nástroj	Stopková fréza D8	
Vyložení nástroje	35 mm	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	250 m·min ⁻¹	100 m·min ⁻¹
f_z	0,035 mm	0,050 mm
a_p	0,7 mm	0,7 mm
a_e	4 mm	4 mm

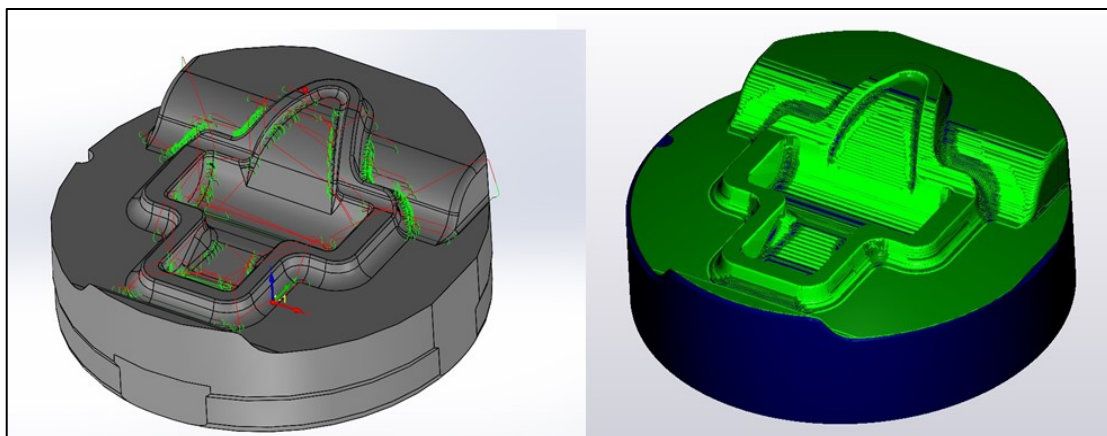


Obr. 3.28 Dráhy hrubování D8, kontrola přídavků po hrubování

5. Hrubování D4

Tab. 3.25 Parametry hrubování D4

Nástroj	Stopková fréza D4	
Vyložení nástroje	35 mm	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	150 m·min ⁻¹	80 m·min ⁻¹
f_z	0,03 mm	0,04mm
a_p	0,5 mm	0,5 mm
a_e	2 mm	2 mm

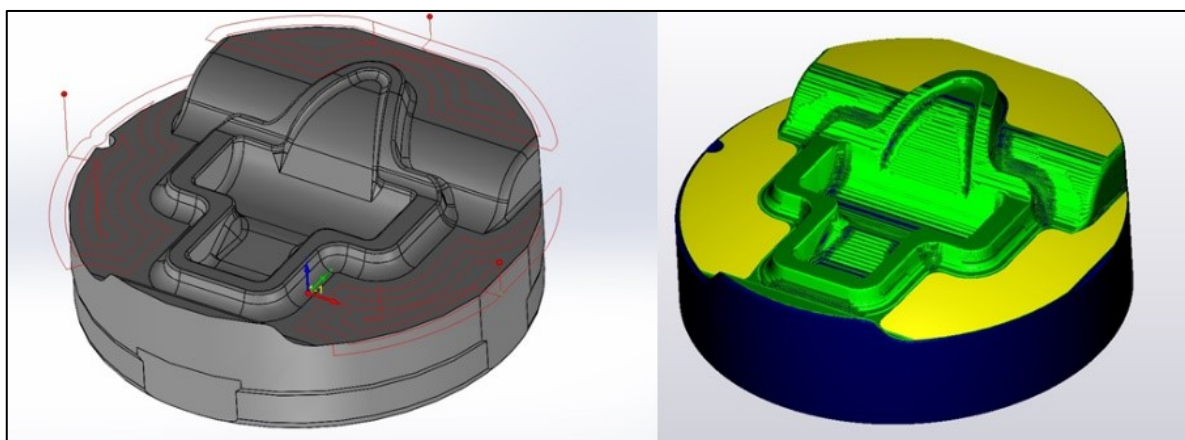


Obr. 3.29 Dráhy hrubování D4, kontrola přídavků po hrubování

6. Dokončení rovinných ploch

Tab. 3.26 Parametry dokončení rovinných ploch

Nástroj	Čelní fréza D20	
Vyložení nástroje	50 mm	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	300 m·min ⁻¹	90 m·min ⁻¹
f_z	0,08 mm	0,08 mm
a_p	0,25 mm	0,25
a_e	10 mm	10 mm



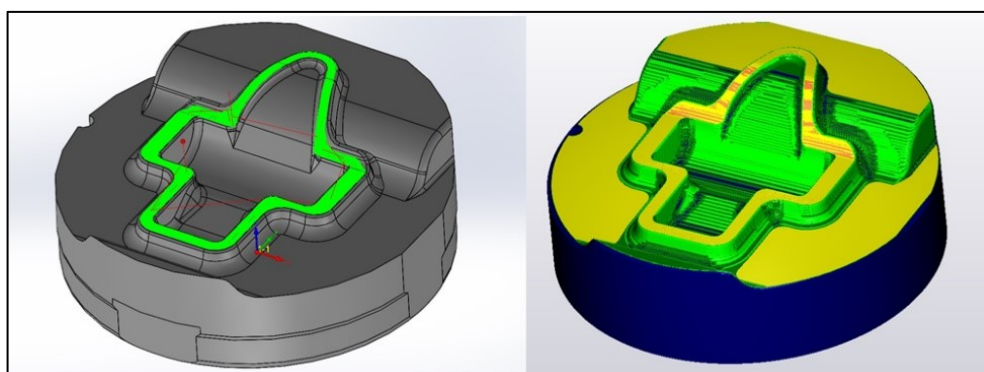
Obr. 3.30 Dráhy dokončování rovinných ploch, kontrola přídavků po dokončování

7. Dokončení dělicí roviny

Nulový bod naklopen o 5° kolem osy X

Tab. 3.27 Parametry dokončení dělicí roviny

Nástroj	Kulová fréza D10	
Vyložení nástroje	60 mm	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	$300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$190 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
f_z	0,15 mm	0,1 mm
a_p	0,3 mm	0,3 mm
a_e	0,3 mm	0,3 mm

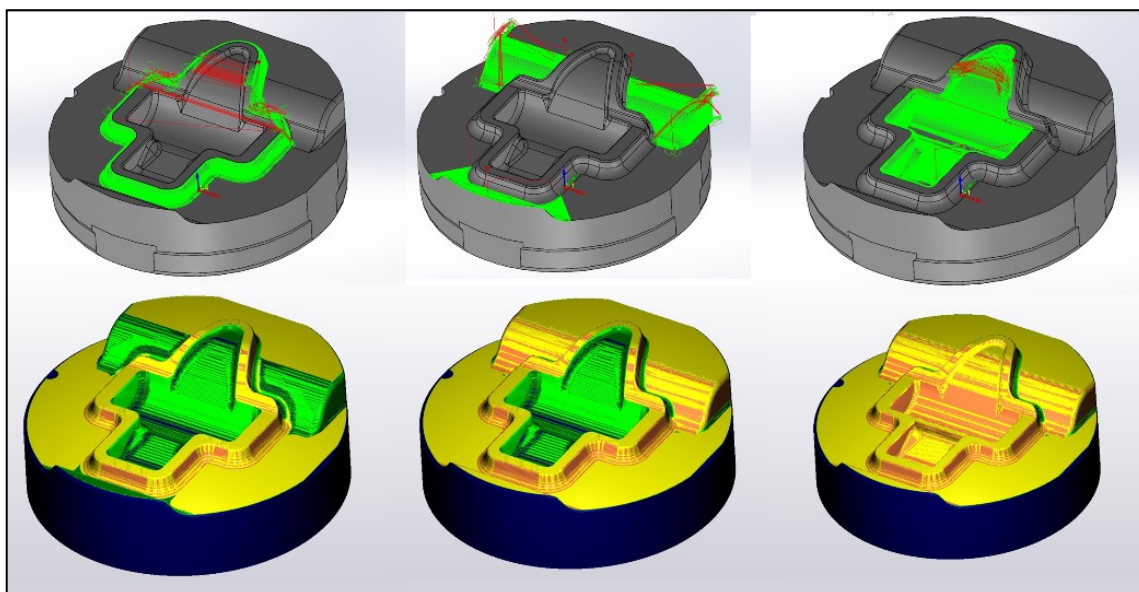


Obr. 3.31 Dráhy dokončení dělicí roviny, kontrola přídavků po dokončování

8. Dokončení D10

Tab. 3.28 Parametry dokončení D10

Nástroj	Kulová fréza D10	
Vyložení nástroje	60 mm	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	$300 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$	$190 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$
f_z	0,15 mm	0,1 mm
a_p	0,3 mm	0,3 mm
a_e	0,3 mm	0,3 mm

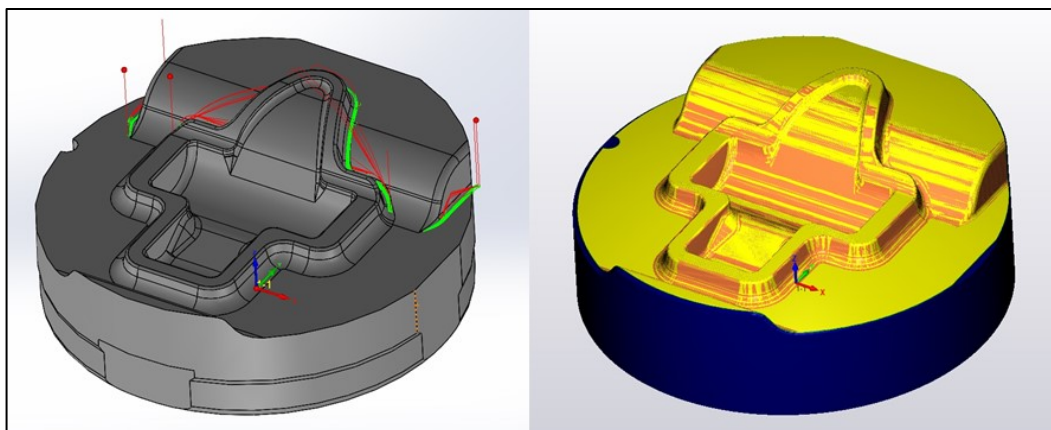


Obr. 3.32 Dokončení D10, kontrola přídavků po dokončování

9. Dokončení D6

Tab. 3.29 Parametry dokončení D6

Nástroj	Kulová fréza D6	
Vyložení nástroje	45 mm	
	Řezné podmínky pro EN AW-6082	Řezné podmínky pro ocel 1.2343
v_c	250 m·min ⁻¹	140 m·min ⁻¹
f_z	0,15 mm	0,1 mm
a_p	0,1 mm	0,1
a_e	0,1 mm	0,1



Obr. 3.33 Dráhy finálního dokončení D6, kontrola přídavků po dokončování



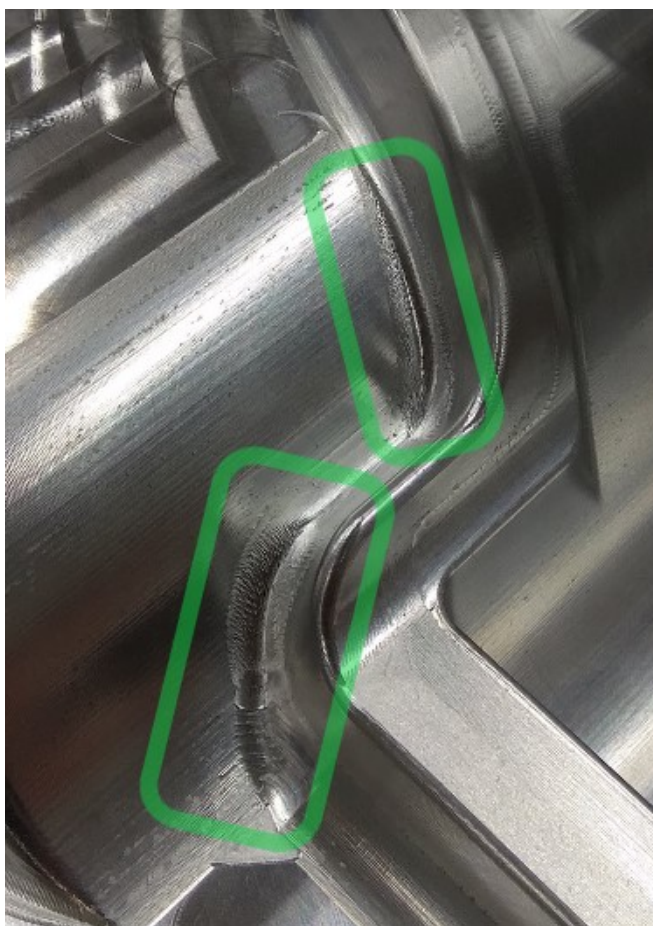
Obr. 3.34 Obrobená 2. strana

4. Zhodnocení

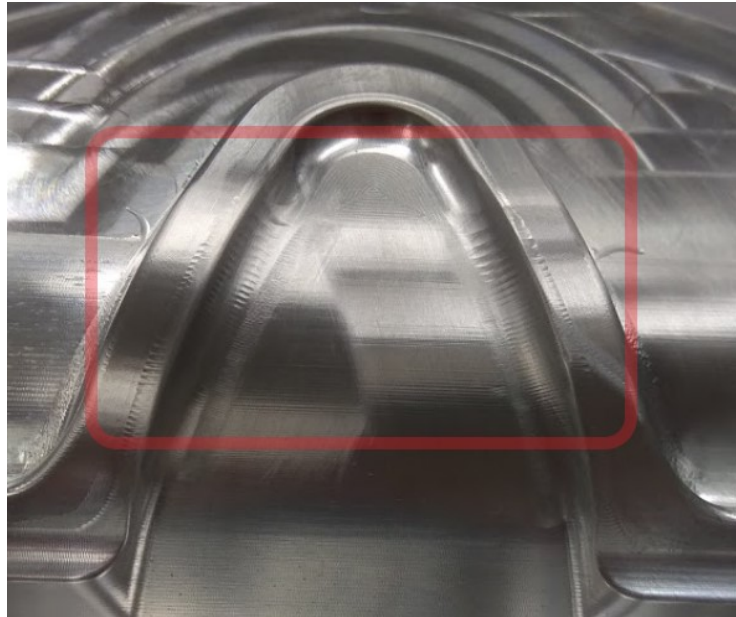
Dle zadání byla vyrobená prototypová zápustka. Tuto zápustku lze hodnotit z hlediska kvality výroby a z hlediska ceny výroby. Z hlediska kvality výroby budou posouzeny nedostatky vzniklé při výrobě. Zvláště bude kladen důraz na vady povrchu prototypové zápustky. Ekonomické zhodnocení bude zaměřeno na porovnání nákladů výroby prototypové zápustky s přibližnými náklady výroby kovací zápustky.

4.1 Posouzení kvality výroby

Kvalitu vyrobené prototypové zápustky značně ovlivňuje drsnost obrobeného povrchu. Ačkoli je zápustka na většině míst hladká, byly nalezeny 3 místa, kde drsnost obrobeného povrchu není optimální. Tyto místa lze zřetelně vidět na Obr. 4.1, Obr. 4.2, Obr. 4.3.



Obr. 4.1 Vada povrchu zápustky č. 1



Obr. 4.2 Vada povrchu zápustky č. 2



Obr. 4.3 Vada povrchu zápustky č. 3

4.1.1 Analýza povrchový vad

Povrchové vady lze rozdělit podle příčiny jejich vzniku. Vady označené na Obr. 4.2 a Obr. 4.3 v červeném obdélníku jsou způsobeny nástrojem *stopková kulová fréza D10*. Vady označené na Obr. 4.1 v zeleném obdélníku jsou způsobeny nástrojem *stopková kulová fréza D6*.

Povrchové vady označené červeným obdélníkem jsou způsobeny rozvibrováním dokončovacího nástroje. Stopy po těchto vibracích lze zřetelně rozpoznat, přejetím prstu po povrchu. Příčinou těchto vibrací je příliš velké vysunutí nástroje z držáku. Vysunutí nástroje z držáku při obrábění bylo 60 mm. Maximální hloubka frézování nástrojem byla 32 mm, a to na dně rádiusové kapsy. Pro eliminaci vzniku vibrací je nezbytné zmenšení vysunutí nástroje z držáku a to z 60 mm na 40 mm.

Povrchové vady označené zeleným obdélníkem jsou také způsobeny vibracemi, ty ovšem nevznikly v důsledku příliš velkého vysunutí nástroje z držáku. Stopy po těchto vibracích jsou méně zřetelné při přejetí prstem po povrchu. Tyto vibrace byly způsobeny příliš velkým opásání nástroje při obrábění. Příčinou velkého opásání je velikost rádiusu drážky a velikost rádiusu dokončovací frézy. Rádus drážky je 3 mm, *kulová fréza D6* má také rádus 3 mm. Stejná velikost rádiusu v drážce a rádiusu nástroje způsobila, že nástroj při dokončování drážky obráběl příliš velkou plochu, což s nezbytným vysunutím nástroje z držáku způsobilo velmi jemné vibrace, které ovšem zřetelně ovlivnily finální povrch. Pro zamezení vzniku těchto vibrací je nezbytné použití menšího průměru kulového dokončovacího nástroje.

4.2 Ekonomické zhodnocení výroby

Ekonomické zhodnocení slouží pro srovnání ceny výroby prototypové zápustky a přibližné ceny výroby kovací zápustky. Do celkové ceny bude zahrnuta i cena materiálu. Pro odhad ceny oceli 1.2343 byl použit ceník společnosti Bohdan Bolzano s.r.o. Hodinová sazba výroby na univerzální frézce DMU 50 + hodinová sazba obsluhy byla stanovena na 1350 Kč/hod.

Tab. 4.1 Cena výroby zápustek

Materiál	Cena materiálu	Cena výroby		Celková cena vyrobené formy
		Čistý čas výroby	Čistá cena výroby	
AlSi1MgMn	5 100 Kč	190 min	4 275 Kč	9 375 Kč
Ocel 1.2343	9 900 Kč	* 839 min	18 877 Kč	28 777 Kč

Pozn: *čistý čas výroby pro ocel 1.2343 byly stanoven přibližně dle porovnání rychlosti posuvů a hloubky třísky.

Dle výpočtu ceny výroby zápustek je zřejmé, že výroba prototypové zápustky je přibližně třikrát levnější než výroba kovací zápustky. Navíc si díky výrobě prototypové formy ověříme technologicky postup a zvolené strategie výroby. Lze tedy považovat výrobu prototypové zápustky za ekonomicky výhodnou.

Závěr

Bakalářská práce se zabývala technologiemi a postupy výroby kovacích zápustek. Byla zde popsána podstata zápusťkového kování především s důrazem na samotné zápustky, dále materiály, tepelné zpracování a povrchové úpravy zápustek.

Dále byla zpracovaná problematika obrábění kovacích zápustek, kde byly charakterizovány způsoby výroby tvarově složitých kovacích zápustek obráběním, ať už na 3osých obráběcích centrech, nebo na víceosých obráběcích centrech. Dále byly charakterizovány vhodné řezné materiály, nástroje a jejich strategie drah. Byly charakterizovány také moderní způsoby výroby kovacích zápustek, mezi které patří vysokorychlostní obrábění a elektroerozivní obrábění.

Cílem praktické části bylo využít teoretické znalosti k výrobě prototypové zápustky z materiálu EN AW-6082 T6. Dle výkresové dokumentace a modelu byl navržen technologický postup výroby na univerzální 5tiosé frézce DMU 50. Dle výkresové dokumentace byl nakoupen polotovár. Poté byla připravena výroba, kde byl zvolen typ upnutí, byl analyzován model a byl navržen technologický postup s řeznými nástroji vhodnými pro výrobu. Výroba probíhala bez komplikací, prototypová zápustka byla úspěšně obrobena z obou stran, a byl zpracován postup výroby, se všemi řeznými podmínkami. Dále byly navrženy řezné podmínky pro ocel W. Nr. 1.2343.

Poslední částí práce bylo zhodnocení. Hodnocení bylo provedeno z hlediska kvality výroby a z hlediska ekonomického charakteru výroby. V části hodnocení kvality výroby byly vyhodnoceny vady na povrchu způsobené nevhodně zvolenou strategií a byl navržen řešení, které zamezí vzniku těchto vad. V části ekonomického hodnocení byla porovnána celková cena prototypové zápustky s odhadem ceny kovací zápustky. Bylo zjištěno, že výroba prototypové zápustky je přibližně třikrát levnější než výroba kovací zápustky a z technickoekonomického hlediska byla výroba prototypové zápustky posouzena jako výhodná.

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Tomášovi Zlámalovi, Ph.D. z Katedry obrábění, montáže a strojírenské metrologie, FS, VŠB – TU Ostrava za jeho vstřícnou pomoc, odborné konzultace a připomínky, kterých mi bylo při tvorbě této bakalářské práce poskytnuto.

Dále děkuji panu Peteru Gufrovičovi za pomoc při výrobě zápusťky, odborné konzultace a cenné rady.

Děkuji také Katedře obrábění, montáže a strojírenské metrologie, FS, VŠB – TUO za hrazení veškerých nákladů, bez kterých by tato práce nemohla být uskutečněna.

Použitá literatura

- [1] LENFELD, Petr. Technologie II. Část 1., Tváření kovů. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-466-5. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
- [2] SŠ-COPT Kroměříž [online]. Copyright ©E [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=46351&revision=-1&instance=2>
- [3] Bralla, James G.. (2007). Handbook of Manufacturing Processes - How Products, Components and Materials are Made - 2.A4 Forging. Industrial Press. Retrieved from <https://app.knovel.com/hotlink/pdf/id:kt006HRTX2/handbook-manufacturing/forging>
- [4] Tváření za tepla [online]. [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.strojnilyceum.wz.cz/maturita/tep/tep12.pdf>
- [5] RYBKA, Helbert. Kování [online]. Střední průmyslová škola Ostrava-Vítkovice, 2014 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://www.spszengrova.cz/texty/texty/PRA/Kovani-UT.pdf>
- [6] KUBÍČEK, Miroslav. Zápustky, rozdělení, úpravy [online]. Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská, 2012 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_20-07.pdf
- [7] DVOŘÁK, Milan. Technologie tváření: VYBRANÉ TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA TEPLA [online]. Brno, 2006 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/index.htm
- [8] Nástrojové Oceli Obecně | TumliKOVO:Technologie strojního obrábění kovů. Technologie strojního obrábění kovů a broušení nástrojů [online]. Copyright © 2010 TumliKOVO [cit. 01.05.2019]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/nastrojovematerialy/nastrojove-oceli/>
- [9] HAŠEK, Vladimír. Kování. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1965.
- [10] Základy metalografie a tepelné zpracování [online]. Kroměříž, 2012 [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=19896&instance=2>
- [11] DRIML, Bohuslav. Kalení a popuštění [online]. Střední průmyslová škola a Vyšší odborná škola Brno, Sokolská [cit. 2019-05-01]. Dostupné z: <http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>

- [12] VÁŇOVÁ, Petra. Základy tepelného zpracování [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2011 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: http://katedry.fmmi.vsb.cz/Opory_FMMI/636/636-Vanova_ZTZ.pdf
- [13] Zpracování nástrojových ocelí: Tváření a tepelné zpracování [online]. Kladno: Bolzano [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/MOP_Zpracovani%20nastrojovych_%20oceli.pdf
- [14] ALTAN, Taylan. Selection of die materials and surface treatments... [online]. Columbus: The Ohio State University [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: https://www.forging.org/uploaded/content/media/Altan_paper_Die_materials_and_surface_treatments6.pdf
- [15] MAŠKOVÁ, Květoslava. Tepelné zpracování oceli [online]. 2017 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/21556340-8-tepelne-zpracovani-oceli.html>
- [16] Základy tepelného zpracování kovů [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: http://jhamernik.sweb.cz/tepelne_zpracovani.htm
- [17] Robotic welding. Absolute Welding and Machining [online]. [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.absolutewelding.com/services/robotic-welding/>
- [18] Weld Repair of Tools and Dies: 10 Popular Q&As. Forge [online]. 2017 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://www.forgemag.com/articles/84651-weld-repair-of-tools-and-dies-10-popular-qas>
- [19] Wear analysis of tools in cold forging... ScienceDirect [online]. 2005 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164805000116>
- [20] SADÍLEK, Miroslav. Postprocesor - slabé místo CAM systémů?. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/postprocesor-slabe-misto-cam-systemu.html>
- [21] BRYCHTA, Josef, Marek SADÍLEK, Robert ČEP a Jana PETRŮ. Progresivní metody v obrábění: studijní opora. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, katedra obrábění a montáže, 2011. ISBN 978-80-248-2513-7.
- [22] SADÍLEK, Marek. Obrábění I: výběr přednášek. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2015. ISBN 978-80-248-3857-1. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.

- [23] ČEP, Robert. *Nástrojové materiály* [online]. Ostrava: VŠB-TU Ostrava [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: http://homel.vsb.cz/~cep77/PREZENTACE/Strojirenske_tehnologie_prednaska_4.pps
- [24] HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM publishing, 2008. ISBN 978-80-254-2250-2.
- [25] HUMÁR, Anton. *Technologie I: technologie obrábění – 1. část* [online]. Vysoké učení technické v Brně, 2003 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [26] MRKVICA, Ivan. *Návody ke cvičení z obráběcích nástrojů. 1. část. 3. vydání*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2016. ISBN 978-80-248-3936-3. Skripta. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [27] *Obráběné materiály. Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/workpiece-materials.aspx>
- [28] *Nástrojové materiály. ELUC* [online]. Olomouc [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1206>
- [29] BRYCHTA, Josef; ČEP, Robert; NOVÁKOVÁ, Jana; PETŘKOVSKÁ, Lenka. *Technologie II - 1. díl*. Ostrava : VŠB - TU Ostrava, 2007. ISBN 978-80-248-1641-8
- [30] *Nástrojové materiály. Sandvik Coromant* [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
- [31] *Co je to tvarové frézování?.* Sandvik Coromant [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/milling/pages/profile-milling.aspx>
- [32] SKOPEČEK, Tomáš. *Frézovací strategie při výrobě forem a zápusťek*. MM Průmyslové spektrum [online]. 2005 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/frezovaci-strategie-pri-vyrobe-forem-a-zapusťek.html>
- [33] HYNEK, Martin. *Elektroerozivní obrábění* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2013 [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: https://kks.zcu.cz/export/sites/kks/projekty-ver-fin/OPVK_PU/KA_05_publikace/KA05_Elektroerozivni_obrabeni.pdf

- [34] Hloubení dutin zápustek a forem. ELUC [online]. Olomouc [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1401>
- [35] Electrode graphite / electrical discharge. Direct industry [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/f-tool/product-51484-402240.html>
- [36] 3D iMachining. SolidCAM [online]. [cit. 2019-05-04]. Dostupné z: <https://www.solidcam.com/cs/imachining/3d-imachining/>
- [37] Tabulka slitin. Strojmetal [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: <https://www.strojmetal.cz/tabulka-slitin>
- [38] X37CrMoV5-1. Bolzano [online]. [cit. 2019-05-06]. Dostupné z: https://www.bolzano.cz/assets/files/TP/Nastrojove_oceli/MOP_X37CrMoV5-1.pdf
- [39] DMU 50. DMG MORI [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/stroje/frezovani/petiose-frezovani/dmu/dmu-50-2nd-generation>
- [40] R220.29I-0052-06.5A. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02949620?section=products
- [41] RPHT1204M0T-6-M08 F40M. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02923701
- [42] 50A05R-S90SD12-C. *Dormer Pramet* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: [http://ecat.pramet.com/img/PICTURES/Milling/Main/Techinfo%20\(PDF\)/English/S90SD12-face.pdf](http://ecat.pramet.com/img/PICTURES/Milling/Main/Techinfo%20(PDF)/English/S90SD12-face.pdf)
- [43] SDMT 120508SR-F. *Dormer Pramet* [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: [http://ecat.pramet.com/img/PICTURES/Milling/VBD_Chip/Geo%20\(PDF\)/Czech/SDMT.pdf](http://ecat.pramet.com/img/PICTURES/Milling/VBD_Chip/Geo%20(PDF)/Czech/SDMT.pdf)
- [44] R217.29-1020.RE-05.2A. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02409449
- [45] RDHT10T3M0T-M05 F40M. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02496865
- [46] 553120R310Z3.0-SIRON-A. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02810369
- [47] 553080R050Z3.0-SIRON-A. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02679372
- [48] 553040R020Z3.0-SIRON-A. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: https://www.secotools.com/article/p_02733911

- [49] JS534100D1B.0Z4-NXT. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z:
https://www.secotools.com/article/p_02928378
- [50] JS532060D1B.0Z2-NXT. Seco [online]. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z:
https://www.secotools.com/article/p_02928210

Seznam příloh

Příloha A – Výrobní výkres kovací zápustky

Příloha B – Snímek zápustky po hrubování D52

Příloha C – Snímek zápustky po hrubování D20

Příloha D – Snímek zápustky po dokončení D6